



ifn-group



Brandenburgische  
Technische Universität  
Cottbus - Senftenberg

**Bachelor – Studiengang Maschinenbau**

# **Bachelor - Thesis**

Thema:

**Optimierung einer Versuchsanlage zur elektrischen  
Autarkie**

Name, Vorname: Britz, Daniel

Matrikel Nummer: 322151

Betreuer:  
Prof. Dr.oec. Hubertus Domschke  
M. Eng. Christin Faulstich  
Dipl.-Ing. Ingo Weidelt

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, dass ich die vorliegende Studienarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war.

Unterschrift des Verfassers

Senftenberg, den 17. Oktober 2016

## Abkürzungen und Symbole

PEMFC	Polymer Exchange Membran Fuel Cell
BMS	Batteriemanagementsystem
PWM	Pulsweitenmodulation
LR	Laderegler
WR	Wechselrichter
HS	Hochsetzsteller
BZ	Brennstoffzelle
PV	Photovoltaik
Wp	Watt peak (Spitzenleistung)
AC	alternating current (Wechselstrom)
DC	direct current (Gleichstrom)
MPPT	maximum powerpoint tracker
LiFePO <sub>4</sub>	Lithium-Eisenphosphat
BMS	Batteriemanagementsystem
BTU C-S	Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg
CCCV	constant current, constant Voltage
PWM	Pulsweitenmodulation
SLP	Standardlastprofil
DRV	Druckregelventiel
MPPT	Maximum Power Point Tracking

## Inhalt

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Abkürzungen und Symbole .....	II
Inhalt.....	III
1 Einleitung .....	1
2 Unternehmensvorstellung.....	2
3 Grundlagen .....	3
3.1 Photovoltaik.....	3
3.2 Brennstoffzelle .....	5
4 Ausgangszustand des Versuchsstandes .....	8
4.1 Energieversorgung mittels einer PV - Anlage.....	8
4.2 Energiepufferung mit Akkumulatoren .....	9
4.3 Redundante Energieversorgung mit einer Brennstoffzelle.....	10
4.4 Steuerung des Versuchsstandes .....	11
4.5 Lade- und Entlade- Steuerung des Akkus .....	12
5 Erweiterung und Optimierung des Versuchsstandes .....	13
5.1 PV - Anlage .....	13
5.1.1 Erweiterung der Anlage mit zusätzlichen Modulen .....	13
5.1.2 Einbindung der diffusen und direkten Strahlung.....	16
5.2 Optimierung der Lade- /Entlade- Steuerung des Akkus.....	18
5.2.1 Systembeschreibung und Aufbau .....	19
5.2.2 Beschreibung der Komponenten .....	20
5.2.3 Variantenvergleich und Beurteilung der Lösungen.....	26
5.3 Brennstoffzelle .....	29
5.3.1 Aufbau des Systems und Komponentenspezifizierung .....	30
5.3.2 Entwicklung einer Brennstoffzellensteuerung.....	33
5.3.3 Programmaufbau des Controllers .....	44
5.3.4 Einbindung des Brennstoffzellensystems .....	48
5.4 Lastprofil Simulation.....	50
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	52
Quellen .....	53
Abbildungsverzeichnis .....	54
Tabellenverzeichnis.....	57

Anhang .....	58
Anhang I Gesamtübersicht .....	58
Anhang II Datenblatt PV-Module .....	59
Anhang III Datenblatt BMS .....	61
Anhang IV Beckhoff Klemme KL3064 .....	63
Anhang V Platinen Layout der Relais-Platine.....	64
Anhang VI Datenblatt Reaktionslüfter .....	65
Anhang VII Programmcode der Brennstoffzellen-Steuerung .....	70
Anhang VIII Schaltplan Brennstoffzellensteuerung.....	83
Anhang IX Oberseite Platinen Layout der Brennstoffzellen-Steuerung .....	84
Anhang X Unterseite Platinen Layout der Brennstoffzellen-Steuerung.....	85

## 1 Einleitung

Die weitgehend autarke Energieversorgung von Siedlungs- und Gewerbestrukturen mit eigenerzeugter Strom-, Wärme- und Wasserversorgung sind weltweit fokussierte Entwicklungsziele zahlreicher Unternehmen. Im Zuge dieser Entwicklung entstand in Deutschland das Bündnis autartec®. Gefördert wird der Zusammenschluss vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) als „Innovativer Regionaler Wachstumskern“.

Dieses Konsortium aus klein- und mittelständischen Industriefirmen, Ingenieurunternehmen, wissenschaftlichen Institutionen sowie künftigen Anwendern hat sich als Ziel gesetzt, ein zumindest semiautarkes ufernahes „schwimmendes autartec® Haus“ der Öffentlichkeit zu demonstrieren. Der zukünftige Standort des FreiLichtHauses wird am Bergheider See auf dem Gelände des F60-Besucherbergwerkes sein. Der Demonstrator (Abbildung 1) vereint weiterentwickelte bekannte sowie neue Technologien.

Architektonisch wurde dabei sehr großer Wert auf die Integration der Technologien in die Gebäudestruktur, ohne den nutzbaren Raum zu beeinflussen, gelegt. Dies erfordert die Verwendung eigens dafür entwickelter funktionstragender autartec® Gebäudehüllen, wie z.B. die dünnwandige Wandelemente aus Textilbeton.



Abbildung 1 "schwimmendes autartec® Haus" im Senftenberger Seenland [1]

Um das spätere Zusammenspiel der semiautarken Energieversorgung des Demonstrators zu planen und zu optimieren, wurde am ifn Anwenderzentrum in Form einer Master Thesis von Herrn Tholeikis ein Versuchsstand entwickelt und geplant. Der Versuchsstand ist ein vom Demonstrator skaliertes Technologiesystem, an dem die unterschiedlichsten Energieerzeugungs- sowie Energieverbraucher-technologien untersucht und aufeinander angepasst werden können. Das System soll in dieser Arbeit mit einer Brennstoffzelle, mit veränderten Photovoltaikmodulen und mit einem System zur Verbrauchssimulation erweitert werden. Des Weiteren werden Optimierungen sowie Auswertungen anvisiert.

## 2 Unternehmensvorstellung

Das ifn Anwenderzentrum GmbH ist Teil der ifn-group. Die ifn-group unterteilt sich in folgende Projektgesellschaften:

- ifn Anwenderzentrum GmbH (IAZ)
- Düngepellet Produkt und Vertriebs GmbH (DPV GmbH)
- ifn Projekt GmbH (IPG)

Das ifn Anwenderzentrum begann seine Geschäftstätigkeit im Jahre 1992 unter der Geschäftsführung von Dipl.-Ing. Manfred Lanzke. Ziel des Unternehmens ist es, nachhaltiges Wirtschaften mit innovativen Ideen und Technologien zu planen und praktisch umzusetzen. Die Ergebnisse finden Anwendung bei der effizienten Energieerzeugung aus regenerativen Quellen sowie bei der optimierten dezentralen Energienutzung und Speicherung. Der Unternehmensverbund verfolgt den Leitsatz:

„Zukunftsverträglichkeit gleich Wachstumsvoraussetzung“ [2]



Abbildung 2 Sitz ifn Anwenderzentrum GmbH in Lauchhammer [2]

## 3 Grundlagen

### 3.1 Photovoltaik

Der Begriff Photovoltaik stammt aus den griechischen (photo = Licht, voltaik = Spannung) und beschreibt die direkte Umwandlung von Lichtenergie in elektrischer Energie. Dazu werden mehrere zusammengeschaltete Fotoelemente in einer Solarzelle genutzt. Diese Elemente besitzen eine N-Dotierte und eine P-Dotierte Schicht. Die beiden Schichten werden von einer Sperrschicht voneinander getrennt. Trifft Licht auf die N-Dotierte Schicht, so zerreißen feste Bindungen im Kristallgitter (Sperrschicht). Es entstehen freibewegliche Elektronen und Löcher. Die Diffusionsspannung treibt die Elektronen zur N-Schicht (negative Ladung) und die Löcher zur P-Schicht (positiv geladen). Es entsteht ein Spannungspotential  $U$  zwischen den Anschlüssen. Dabei sind die Spannung und die Stromstärke abhängig von der Beleuchtungsstärke. Das Prinzip und Schaltzeichen ist in der Abbildung 3 dargestellt.

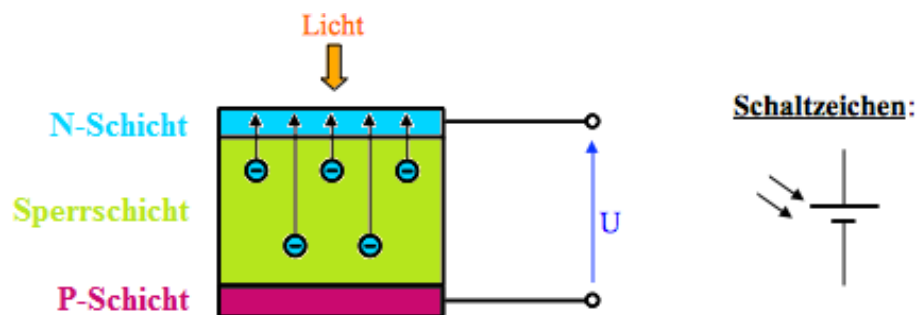


Abbildung 3 Prinzipielle der Spannungserzeugung in einem Fotoelement [3]

Es werden unterschiedliche Materialien für den Aufbau einer Solarzelle genutzt. Das verwendete Material hat direkten Einfluss auf den Bereich des genutzten Strahlungsspektrums, den Wirkungsgrad, die Spannung sowie des Stromes der Zelle. Es wird Unterteilt in Silicium Zellen, Organische Zellen, Farbstoffzellen, Halbleiter-Elektrolytzellen sowie in mehreren Halbleiter-Solarzellen. Am häufigsten werden Silicium Zellen eingesetzt. Diese Zellen erreichen unter Laborbedingungen Wirkungsgrade von über 20 % und sind günstig zu produzieren, da Silicium nahezu unbegrenzt zur Verfügung steht. Photovoltaik-Anlage auf Dachflächen sowie die in der Arbeit verwendeten bestehen aus Silicium. Aus diesem Grund wird in der Arbeit nur auf diesen Typ genauer eingegangen. Silicium Zellen werden nochmals nach ihrer Herstellung in drei Kategorien eingeteilt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Einteilung der Silicium Solarzellen [4]

Art	Wirkungsgrad	Aufbau	Anwendung
Amorphe Zellen	5 – 10 %	Auf Glasplatte aufgedampftes Silicium	Kleingeräte
Monokristalline Zellen	15 – 22 %	Gezüchtete Silicium-Einkristalle	Raumfahrt
Polykristalline Zellen	10 – 15 %	Wird aus mehreren Silicium-Kristallen gegossen	Solarmodule



Die verwendeten Solarpanels sind Polykristalline Zellen des Herstellers Renesolas mit einem angegebenen Wirkungsgrad von bis zu 15,4 % bei einer maximalen Leistung von 250 W. Die Ermittlung der Kenngrößen erfolgt nach den Standard-Testbedingungen. Die Solarzellen werden nach den normierten Bedingungen bestrahlt:

- Einstrahlungsstärke  $E = 1000 \text{ W/m}^2$
- Umgebungstemperatur  $25^\circ\text{C}$
- Strahlungsspektrum AM 1,5 global

Die Air Mass AM 1,5 ist in der DIN EN 61215 verankert und beschreibt die Lichtstrahlung nachdem sie die 1,5-fache Atmosphärenhöhe durchlaufen hat. Dabei wird die Globalstrahlung in direkter und indirekter unterteilt und das Strahlungsspektrum wird verschoben.

Der Wirkungsgrad von Solarzellen ist das Verhältnis von elektrischer Leistung pro Fläche zur Globalstrahlung/Einstrahlungsstärke. Mit Hilfe dieses Zusammenhangs und substituieren der Kennwerte aus den Technischen Kennwerten ergibt sich ein somit der Wirkungsgrad von:

**Formel 1**

$$\eta = \frac{P_{\text{elektrisch}}}{P_{\text{Licht}}} = \frac{250 \text{ W}}{1000 \text{ W/m}^2 \cdot 1,64 \text{ m} \cdot 0,994 \text{ m}} \cdot 100 \% = 15,3 \%$$

Pro Zelle entsteht ein Spannungspotential im Leerlauf von 0,6 Volt. Die verwendeten Panels besitzen 60 Zellen. Folglich ergibt sich eine Leerlaufspannung  $U_{OC} = 0,6 \text{ V} \cdot 60 = 36 \text{ V}$ . Solarzellen besitzen einen Arbeitspunkt an denen sie ihre maximale Leistung abgeben. Den sogenannten Maximum Power Point (MPP). Dieser Punkt ist abhängig vom Zellentyp sowie von der Bestrahlungsstärke. Die Strahlungsstärke verändert sich in der Praxis ständig. Aus diesem Grund müssen Wechselrichter, die den Gleichstrom aus den Zellen ins Wechselstrom Netz speisen, in zeitlichen Intervallen immer wieder die Strom-Spannung-Kennlinie abfahren und den Arbeitsbereich anpassen. Eine typische Strom-Spannung-Kennlinie einer Solarzelle ist in der Abbildung 4 dargestellt.

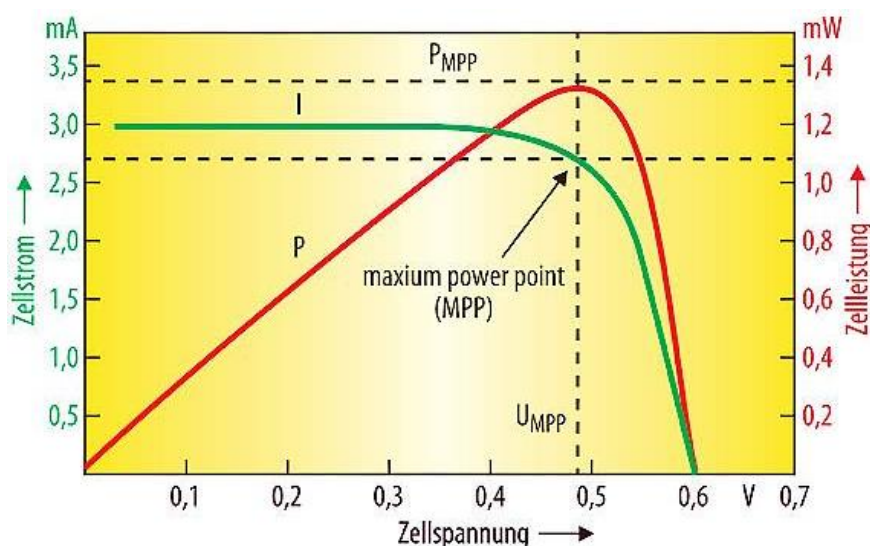


Abbildung 4 Strom-Spannung-Kennlinie einer Solarzelle [5]

### 3.2 Brennstoffzelle

Es gibt verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die sich aber vom Funktionsprinzip nicht unterscheiden. Die elektrochemische Reaktion findet dabei stets in zwei Teilreaktionen statt. An der Anode werden Elektroden freigesetzt (Oxidationsreaktion) und an der Kathode aufgenommen (Reduktionsreaktion). Ein Elektrolyt trennt die Kathode und Anode räumlich. Dieser ist nur für die Ionen leitend. Die Elektronen werden von der Anode durch einen elektrischen Verbraucher zur Kathode geleitet und verrichten dabei elektrische Arbeit. Die direkte Umwandlung der chemischen Energie des Brennstoffes in elektrischen Strom, ohne Umwege über thermische oder kinetische Energie, ermöglicht sehr viel höhere Wirkungsgrade gegenüber Verbrennungsprozessen. Diese direkte Umwandlung wird auch als kalte Verbrennung bezeichnet. Die verschiedenen Brennstoffzellen-Typen unterscheiden sich im Aufbau sowie in den verwendeten Materialien, den Reaktionsgasen und in der Betriebstemperatur. Es gibt die Festelektrolyt- (SOFC), Schmelzkarbonat- (MCFC), Phosphorsäure- (PAFC), Alkalische- (AFC), Direkt-Methanol- (DMFC) und die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC). In dieser Arbeit wird besonderes Augenmerk auf die PEM-Brennstoffzellen gelegt, da die später verwendete Brennstoffzelle eine PEMFC ist. Die Betriebstemperatur der PEM-Zellen liegt zwischen 0 und 60 °C. Bei der PEMFC werden Wasserstoff und Sauerstoff über Strömungskanäle in poröse Gasdiffusionsschichten gepresst und an der Drei-Phasen-Grenzfläche (Katalysator, Elektrolyt und Gas) zu Wasser und elektrischem Strom gewandelt (Abbildung 5).

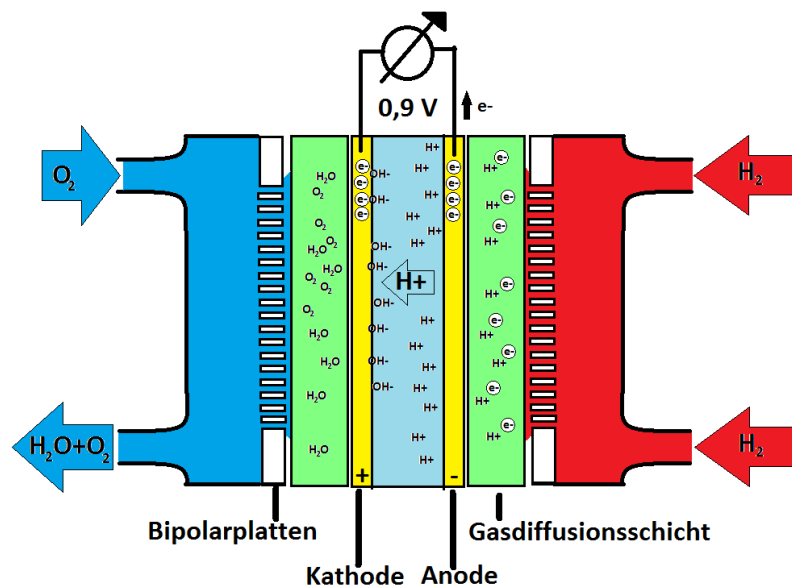


Abbildung 5 Schema einer Brennstoffzelle [3]

Auf den Gasdiffusionsschichten sind zur Membran hin Platinpartikel<sup>1</sup> aufgebracht. Diese fungieren als Katalysator und sind für die chemische Reaktion notwendig. Als Elektrolyt dient eine Polymerelektrolytmembran. Die Membran ist nur für Ionen leitfähig und trennt die beiden Gase voneinander. Um eine gute Ionenleitfähigkeit und eine sichere Abdichtung zu gewährleisten, muss die Polymerelektrolytmembran mit Wasser auf beiden Seiten feucht gehalten werden. Sie darf aber nicht zu feucht

<sup>1</sup> In einigen Fällen werden auch andere Edelmetalle verwendet. Bevorzugt aber Platin, da es eine hohe Absorptionsfähigkeit für Wasserstoff besitzt. Der Anteil an den Partikeln liegt bei etwa 0,5 mg/cm<sup>2</sup>.

sein, da sich sonst die Kanäle der Gasdiffusionsschicht zusetzen und der Gastransport nicht mehr ausreichend gewährleistet werden kann. Aus den Reaktionsgasen ergeben sich die Teilreaktionen:



Ist der Stromkreis zwischen der Anode und Kathode nicht geschlossen, entsteht ein Spannungspotential, da die Ionen zwar durch die Elektrolytschicht wandern, aber die Elektronen nicht von der Anode zur Kathode gelangen können. Eine Zelle kann eine reversible Zellspannung von 1,23 V erreichen.

In der Praxis werden Leerlaufspannungen von 950 bis 1000 mV erzielt. Dies liegt an der kinetischen Hemmung der Sauerstoffreduktion und an baulich bedingten Ursachen, wie dem Innenwiderstand der Zellen. Wenn von Brennstoffzellen gesprochen wird, dann ist meistens die Rede von Brennstoffzellen-Stacks. Dazu werden mehrere Zellen seriell zu einem Stapel (Stack) zusammengeschaltet. Diese Reihenschaltung der Zellen erhöht die Stackspannung und somit auch die Leistung des Systems. Als Kontaktfläche zwischen den Zellen werden die Strömungskanäle benutzt. Daher werden die Strömungskanäle oft auch als Bipolarplatten bezeichnet. Diese bestehen aus einem leitfähigen Material, meist Graphit. Der maximale Strom ergibt sich aus der aktiven Zellfläche und der Stromdichte. Die Stromdichte einer PEMFC liegt herstellerabhängig im Bereich von 0,6 bis 1 A/cm<sup>2</sup>. Dieser Wert ist abhängig von den verwendeten Materialien und dem Anteil der Partikel im Katalysator. Eine BZ (Brennstoffzelle) verhält sich ähnlich wie eine Batterie. Bei steigendem Strom erhöhen sich die Ohm'schen Verluste, was eine Temperaturerhöhung und folglich eine Innenwiderstandserhöhung zur Folge hat. Die Zellspannung fällt linear. Zusätzlich treten an den Elektroden elektrische Verluste in Form von Überspannungen auf, die einen nicht linearen Abfall der Zellspannung bewirken. Diese beiden Effekte ergeben die bekannten Kennlinien einer BZ.

Die Versorgung eines BZ - Systems erfolgt häufig über in Druckflaschen gespeicherten Wasserstoff. Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit, den Wasserstoff flüssig in Tanks oder chemisch gebunden in Metallhydrid Flaschen zu speichern. Da die Verflüssigung des Wasserstoffs sehr energieintensiv und die sichere Isolierung des Tanks sehr aufwändig ist, wird diese Technologie selten benutzt. Der Vorteil der flüssigen Speicherung liegt in der hohen Speicherkapazität. Bei Metallhydrid Flaschen wird der Wasserstoff durch chemische Bindungen in einem Metallgeflecht gespeichert. Nachteile dieser Technologie sind das hohe Gewicht und der lange Befüllungsvorgang. Bei erhöhtem Volumenstrom kühlen die Flaschen ab und setzen keinen Wasserstoff mehr frei. Um dies zu verhindern, wird in den meisten Fällen die Abwärme des Stacks zum Erwärmen der Flasche benutzt.

Der dem Speicher entnommene Wasserstoffdruck wird über ein Druckregelventil reduziert. Die Membran einer PEMFC kann maximale Druckdifferenzen zwischen Anode und Kathode von 1 bar verkraften. Üblich sind Systemdrücke von circa 0,5 bar. Bei hohem Systemdruck diffundieren die Wasserstoffatome vermehrt durch die Elektrolytschicht. Dies wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad des BZ-Systems aus. Bei zu niedrigem Systemdruck besteht die Gefahr einer Unterversorgung der Zellen. Es befindet sich zwar genügend Wasserstoff im Anodengasraum, aber nicht an allen Stellen der aktiven Reaktionsschicht. Es kommt zu irreversiblen lokalen Schäden. Um eine Unterversorgung der Zellen zu vermeiden, kann mit Hilfe einer Pumpe eine permanente Wasserstoffströmung im Stack realisiert werden (closed loop). Bei kleinen BZ-Systemen wird der Stack oft im „dead end“ betrieben. Die Wasserstoffversorgung erfolgt dabei nur über den Systemdruck. Zwischen dem Druckregelventil (DRV) und dem Stack befinden sich noch sicherheitsrelevante Schutzmechanismen, wie ein Überdruckventil und mindestens ein Druckfreigabeventil. Ein am System befindlicher

Wasserstoffsensor schaltet im Fehlerfall ab. Die Sicherheitskette wird unterbrochen und schließt somit das Druckfreigabeventil.

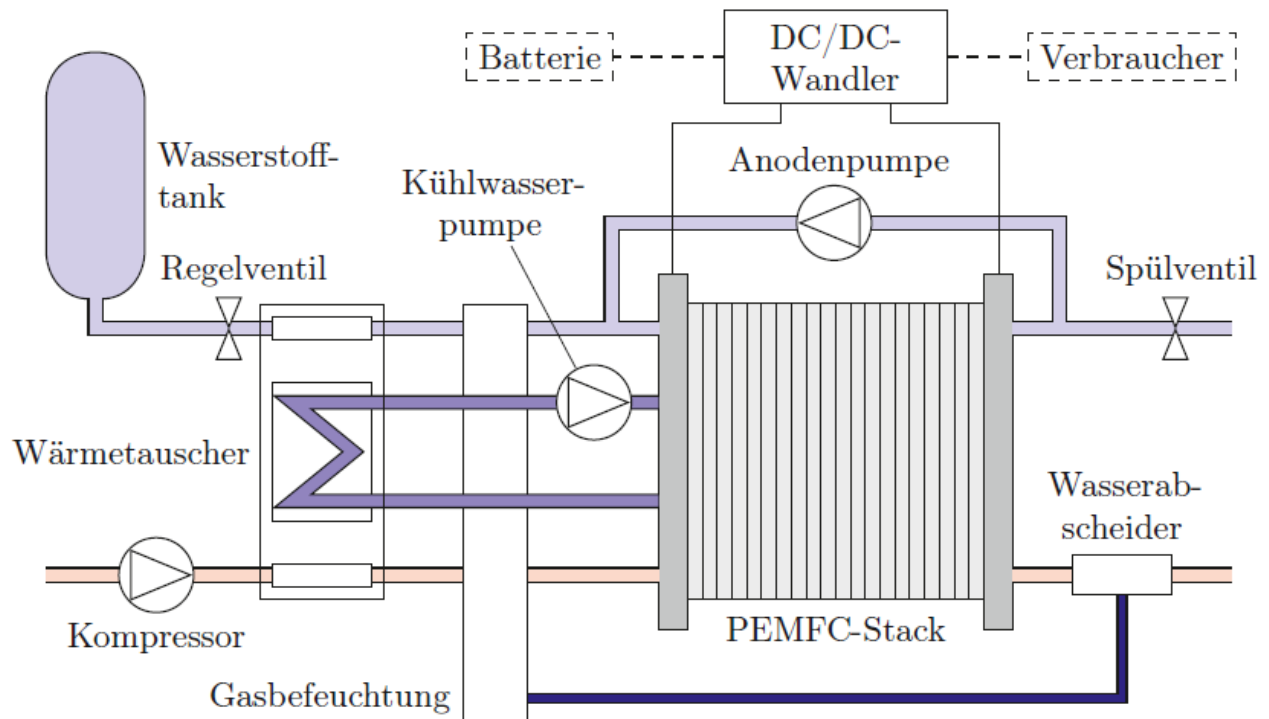


Abbildung 6 Übersicht eines üblichen FC-Systems [6]

Die Kathode kann mit Sauerstoff oder mit Luft versorgt werden. Um eine sichere Versorgung der Kathode mit Reaktionsgas zu gewährleisten, muss bei der Versorgung mit Luft (Sauerstoffanteil von  $\approx 21\%$ ) ein 5-fach größeres Fördervolumen als bei der Versorgung mit direktem Sauerstoff realisiert werden. Dies führt zu höherem Energiebedarf. Dennoch wird oft als Reaktionsgas Luft gewählt, da das Medium praktisch kostenlos zur Verfügung steht. Es gibt zwei mögliche Bauarten für die Versorgung der Kathode mit Reaktionsgas, die des offenen und die des geschlossenen Kathodenraumes. Bei Systemen mit geschlossenem Kathodenraum (Abbildung 6) können weniger Fremdpartikel ins System gelangen. Des Weiteren ermöglicht das System höhere Betriebsdrücke. Das Reaktionsgas wird dazu mit Hilfe eines Kompressors komprimiert oder wird direkt aus einer Druckflasche dem System zugeführt. Eine Unterversorgung der Zellen bei großen Leistungen wird dadurch verhindert. Bei kleineren Leistungen wird oft ein offener Kathodenraum verwendet. Der offene Kathodenraum dient zusätzlich der Reaktionsgaszuführung für die Kühlung der Zellen. Das Reaktionsgas ist bei dieser Bauart immer Luft. Bei automobilen Anwendungen kann der entstehende Fahrtwind dem System direkt zugeführt werden. Dies spart Energie, die für den Zuluftlüfter benötigt werden würde. Eine Regulierung des Wasserhaushaltes an den Kathoden ist bei dieser Technologie aufwändiger und erfolgt oft nur durch ein Kurzschließen des Stacks.

## 4 Ausgangszustand des Versuchsstandes

Der vorhandene Versuchsstand am ifn Anwenderzentrum in Lauchhammer ist in mehrere Teilsegmente gegliedert. Im Zentrum befindet sich ein **Thermospeicher**. Dieser kann direkt oder indirekt durch Energieerzeuger geladen und von unterschiedlichen Verbrauchern entladen werden. Zu den direkten zählen das **Blockheizkraftwerk (BHKW)** und eine **Solarthermie-Anlage**. Die **PV-Anlage**, die **Brennstoffzelle** und die **Akkumulatoren** können indirekt über ein im Puffer integriertes **Heizelement** den Speicher laden. Entladen wird der Puffer über den **Heizungskreislauf im Technikum** sowie über ein für die Schafwoll-Pellets-Herstellung erforderliche **Trocknungsanlage**. Um ein Einfrieren des Heizungskreislaufes im Technikum an ertragsniedrigen Tagen zu verhindern, wurde eine Versorgung des Systems über die **Gasheizung des ifn Hauptgebäudes** mit integriert. Das Gesamtschema ist im dem Anhang I angefügt.

Im folgenden Abschnitt wird auf die für die Bachelor Thesis wichtigen Komponenten genauer eingegangen und präzisiert. Im Fokus stehen dabei die elektrischen Erzeuger sowie Verbraucher.

### 4.1 Energieversorgung mittels einer PV - Anlage

Am Versuchsstand wurden vier Photovoltaikmodule von der Firma Renesola Zhejiang Ltd. verwendet. Jedes Modul des Typs Renesola Virtus IJC250M-24Bb verfügt über eine maximale Leistung von 250 Wp und ist polykristallin aufgebaut. Das Datenblatt ist dem Anhang II zu entnehmen. Jeweils zwei Module wurden in Reihe zu einem String verschaltet (Abbildung 8). Jeder String besitzt einen eigenen Wechselrichter.

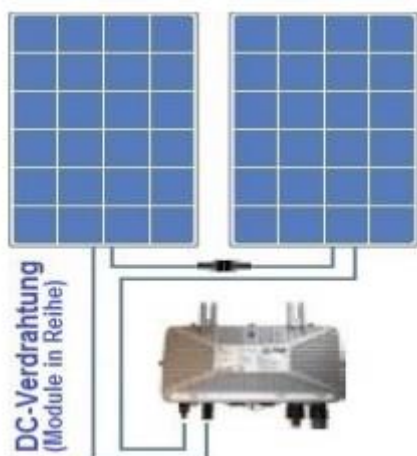


Abbildung 8 Modul Verschaltung [7]



Abbildung 7 Microinverter INV500-90EU RS485 [7]

Ein Microinverter der Firma AEConversion des Typs INV500-90EU RS485 (Abbildung 7) wandelt die 72 Volt DC auf 230 Volt AC um und besitzt eine Maximalleistung von 500 W. Die Wechselrichter arbeiten netzsynchron, das erfordert ein paralleles Verschalten der Inverter mit dem Betriebsnetz. Der Inverter besitzt, wie es für Wechselrichter für Photovoltaik - Anlagen üblich ist, einen maximum powerpoint trackker (MPPT). Dieser folgt dem optimalen Arbeitspunkt der Module je nach Verschattung und Einstrahlung der Sonne. Die Wechselrichter sind in Reihe zu einem RS485 Bus



verbunden und können separat ausgewertet werden. Es besteht die Möglichkeit die Eingangsspannung und den –strom, Ausgangsspannung und – strom sowie die Betriebstemperatur auszulesen. Dies ist für die Auswertung und Quantifizierung fundamental wichtig.

## 4.2 Energiepufferung mit Akkumulatoren

Für eine Versorgung bei Tagen mit geringem Solarertrag und in der Nacht wird die elektrische Energie aus einem Akkumulator entnommen. Ein Überschuss an PV-Ertrag wird durch Aufladen der Akkus gepuffert. Am Versuchsstand wird ein Lithium-Eisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ) verwendet. Diese Akkutechnologie zeichnet sich durch ihre hohe Energiedichte und im Vergleich zu Bleiakkus durch eine hohe Lebenserwartung aus. Die hohe Anzahl an Ladezyklen ist auf den sehr geringen Memory-Effekt zurückzuführen. Der Memory-Effekt ist so gering, dass er sogar vernachlässigt werden kann. Als Memory-Effekt wird der Kapazitätsverlust eines Akkumulators in Abhängigkeit von der Zeit bezeichnet. Dieser äußert sich durch einen frühen Spannungsabfall. Weitere Vorteile sind die hohen Entlade- sowie Ladeströme. Eine  $\text{LiFePO}_4$ -Zelle hat eine Nominalspannung von 3,2 Volt. Am Versuchstand werden vier Zellen mit einer Kapazität von 100 Ah verschaltet. Somit stehen 1.280 Wh ( $4 \cdot 4 \cdot 4,2 \text{ V} \cdot 100 \text{ Ah}$ ) zur Verfügung. Am Demonstrator werden später Akkumulatoren mit einer nutzbaren Kapazität von circa 50 kWh verbaut. Das ergibt eine Skalierung von 1:40.



Abbildung 9  $\text{LiFePO}_4$  Akku mit BMS am Versuchsstand [3]

Lithium-Technologien, somit auch die verwendeten  $\text{LiFePO}_4$ , erfordern Schutzschaltungen, die die Zellen vor Überspannungen und Unterspannungen schützen. Diese Schutzschaltungen sind notwendig, da bei Tiefenentladungen oder Überladungen der Zellen diese aufblähen und ein explosionsgefährliches Gemisch freisetzen. Wenn dieser Prozess weiter fortschreitet, kann es sogar zur Explosion kommen. Diese Schutzschaltungen werden von einem Batteriemanagementsystem (BMS) übernommen. Am Versuchsstand wird ein BMS der Firma i-tecc verwendet (Abbildung 10). Dieses ist

für  $\text{LiFePO}_4$ -Akkus mit vier Zellen geeignet und schaltet bei Erreichen einer Zellspannung von 2 Volt bzw. 3,8 Volt ab. Der maximale Strom ist auf 60 A und folglich auf einer Leistung von  $12,8 \text{ Volt} \cdot 60 \text{ A} = 768 \text{ W}$  begrenzt. Das Datenblatt mit genaueren technischen Spezifizierungen ist dem Anhang III zu entnehmen.

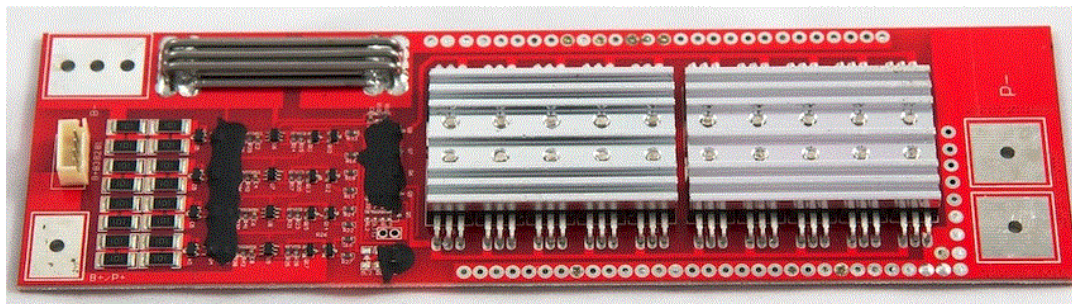


Abbildung 10 BMS von i-tecc [8]

### 4.3 Redundante Energieversorgung mit einer Brennstoffzelle

Eine rein zuverlässige elektrische Energieversorgung alleine mit der Kombination aus Solaranlage und Akkumulatoren würde einen zu großen Energiespeicher bedeuten und wäre folglich mit immensen Kosten verbunden. Der Energiespeicher muss fehlende Erträge, wie z.B. im Winter durch Verdeckung der Module von Schnee, um mehrere Tage vollkommen kompensieren. Eine Erzielung der kompletten Autarkie ist somit in der Realität nur sehr schwer und mit hohem Kostenaufwand erzielbar.

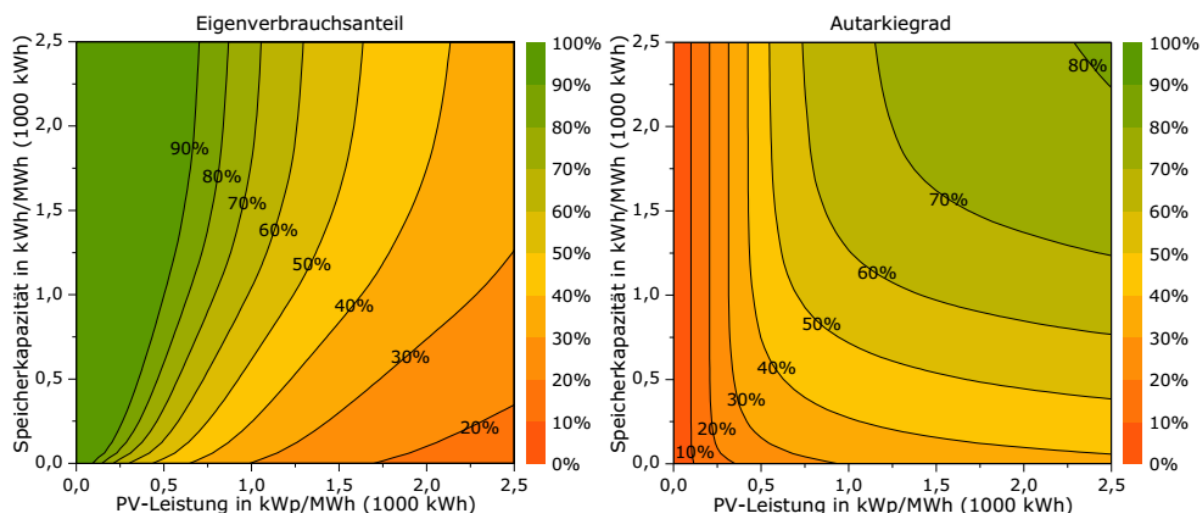


Abbildung 11 Eigenverbrauchsanteil (links) und Autarkiegrad (rechts) in Abhängigkeit der PV-Leistung und nutzbaren Speicherkapazität, jeweils normiert auf den Jahresverbrauch an elektrischer Energie in MWh (1000 kWh) [9]

Es besteht die Möglichkeit, die fehlenden Erträge, die durch zu geringe Globalstrahlung oder verdeckte Module entstehen, mit einer Brennstoffzelle zu kompensieren. Um Kosten zu sparen, wird am Versuchsstand auf einer von der BTU C-S vom Shell Eco-marathon® Team Lausitz Dynamics zur Verfügung gestellten Brennstoffzelle zurückgegriffen. Dieses System ist eine PEMFC von Heliocentris des Typs Nexa 1200 (Abbildung 12). Das System wandelt Wasserstoff und Sauerstoff in

elektrische Energie um. Als Emission entsteht nur Wasser. Der dazu benötigte Wasserstoff wird von der Linde AG gesponsert. Die Anlage besaß bei der Anschaffung eine maximale Leistung von 1200 Wp. Das System stammt allerdings aus dem Jahr 2009 und hat auf Grund von Alterungserscheinungen Leistungseinbußen von bis zu 50%. Die maximale nutzbare Leistung beträgt folglich nur noch 600 Wp.



Abbildung 12 Heliocentris Nexa 1200 [10]

#### 4.4 Steuerung des Versuchsstandes

Das Zu- und Abschalten der verschiedensten Systeme wird zentral von einem Schaltschrank gesteuert. Das Herzstück des Steuerschranks ist eine speicherprogrammierte Steuerung (SPS) der Firma Beckhoff (Abbildung 13). Die zentrale Recheneinheit (CPU) ist eine CX9020 und kann mit weiteren Klemmen, die für die unterschiedlichsten Anwendungen, wie z.B. als digitale Ausgänge oder Eingänge oder zum Erfassen von analogen Werten geeignet sind, erweitert werden. Die SPS besitzt ein zur Visualisierung der Versuchsanlage an der Schaltschranktür montiertes Panel. Das Multi-Touch-Display dient als Schnittstelle zwischen Benutzer und Anlage und wird daher als Human – Maschine – Interface (HMI) bezeichnet. Es werden nicht nur der Anlagen-Zustand und die Messwerte visualisiert, es besteht auch die Möglichkeit, die unterschiedlichen Steuerparameter zu verändern. Die CPU besitzt eine Windows NT Oberfläche, die die Möglichkeit eines Fernzugriffs bietet. Dazu kann ein Webinterface programmiert werden, das den Zugriff von überall auf der Welt ermöglicht.



Abbildung 13 Beckhoff-Steuerung im Schaltschrank [3]



## 4.5 Lade- und Entlade- Steuerung des Akkus

Die Steuerung für das Umschalten des elektrischen Verbrauchs über den PV-Strom, die Brennstoffzelle oder den Akku sowie das Steuern des Ladens des Akkus wird mit Hilfe einer Schalttafel realisiert. Die Schalttafel wurde durch den Bündnispartner BTU C-S unter der Leitung von Prof. Dr. nat. Friederich Weidhase entwickelt. Diese steuert die Schaltvorgänge nach einem im Mikroprozessor einprogrammierten Algorithmus. Nach Erreichen des einprogrammierten PV-Stromes beginnt das Laden des Akkus. LiFePO<sub>4</sub>-Akkus müssen mit konstantem Strom, konstanter Spannung, dem sogenannten CCCV-Verfahren geladen werden. Dazu wurde ein Laderegler mit einer Leistung von 90 W verbaut. Die in der Schalttafel eingebaute Steckdose wird dabei von der PV-Anlage gespeist. Bei zu geringem Ertrag erfolgt diese Versorgung aus der Batterie. Dazu wird der im Akku gespeicherte Gleichstrom mit einem Wechselrichter in den benötigten Wechselstrom gewandelt. Der in der Schalttafel verbauten Wechselrichter hat eine Leistung von 300 W und kann kurze Spitzenleistungen von bis zu 600 W abpuffern. Das Gerät arbeitet als Inselösung und benötigt somit keine Netzfrequenz. Bei Umschaltvorgängen muss allerdings auf ein Filtern und Trennen der unterschiedlichen Frequenzen geachtet werden. Ein gleichzeitiges Schalten der unterschiedlichen Systeme führt zu einer zu großen Phasenasymmetrie und zu Schäden an den Geräten.

Der Lade- und Entladestrom, die Akkuspannung, die PV-Spannung sowie der PV-Strom werden an der Schalttafel visualisiert. Schaltvorgänge der einzelnen Zustände können über Kippschalter an der Tafel per Hand geschaltet werden.

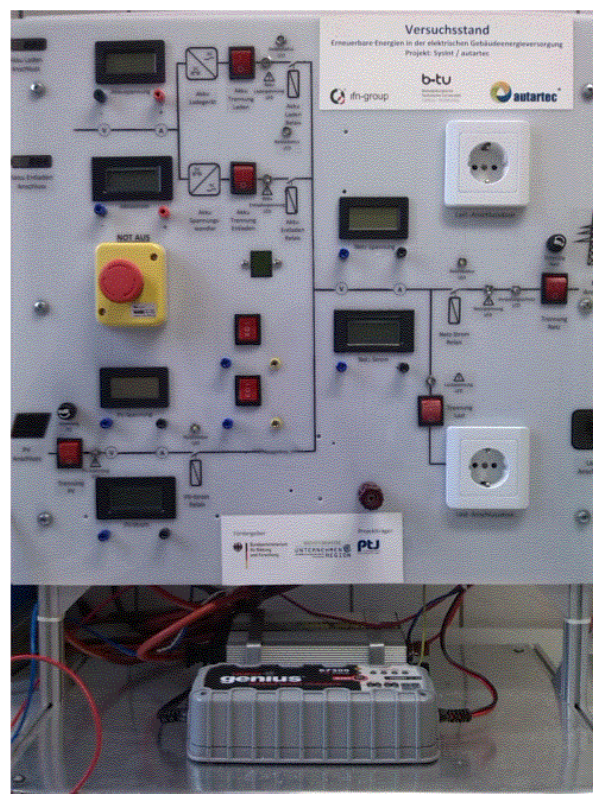


Abbildung 14 Schalttafel der BTU C-S [3]

## 5 Erweiterung und Optimierung des Versuchsstandes

### 5.1 PV - Anlage

#### 5.1.1 Erweiterung der Anlage mit zusätzlichen Modulen

Am Versuchsstand wurden Solarmodule mit einem Anstellwinkel  $\alpha$  von  $30^\circ$  verbaut. Dieser Neigungswinkel ist angepasst für Erträge in Sommermonaten und beschreibt den Winkel zwischen der horizontalen Ebene und dem Solarpanel (Abbildung 15). Das Maximum ist erfüllt, wenn die Bedingung  $\alpha = 90^\circ - h_s$  erfüllt ist (Schmidt, 2014), wobei  $h_s$  den aktuellen Sonnenwinkel beschreibt.

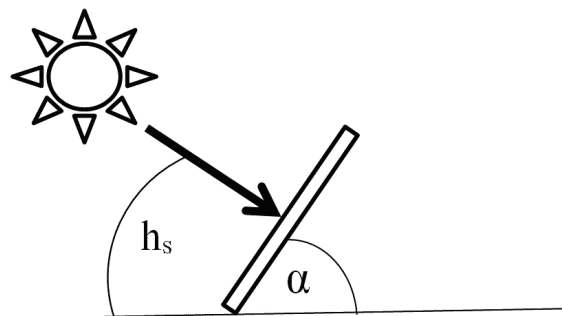


Abbildung 15 Sonnenwinkel und Anstellwinkel [3]

Am späteren Demonstrator sollen die Panels den Ertrag in Wintermonaten maximieren. Das kompensiert den Überertrag in den Sommermonaten und verschiebt den Verlauf der Ertragskurve in eine günstigere Lage. Der maximale Sonnenwinkel  $h_s$  ist in Wintermonaten geringer als in Sommermonaten. Um zusätzlich den architektonischen Raum nicht zu verringern, wurde daher ein Anstellwinkel  $\alpha$  von  $70^\circ$  gewählt. Die unterschiedliche Ertragsausbeute soll am Versuchsstand verglichen und begründet werden.

Dazu wurden aussortierte, defekte Solarpanels von einer Firma aus Zittau wieder instandgesetzt und montiert. An den Zellen wurden durch Überspannung die Bypass-Dioden zerstört. Eine Fotozelle kann vom Prinzip her wie eine Halbleiterdiode betrachtet werden. Bei Verschmutzung oder Verschattung fungieren die Zellen nicht mehr als Stromerzeuger, sondern als Widerstand. Der erzeugte Strom wird in den Zellen in Wärme umgewandelt und somit entstehen erhebliche Ertragseinbußen. An diesen Stellen kann es zu Überhitzungen und somit zu Defekten im Modul (Hot Spot) kommen. Um dies zu verhindern, kann durch antiparalleles Verschalten von Bypass-Dioden dieser Strom an den Zellen vorbeigeführt werden. Die Arbeitsweise, wenn eine Zelle verschattet ist, ist in Abbildung 16 dargestellt.

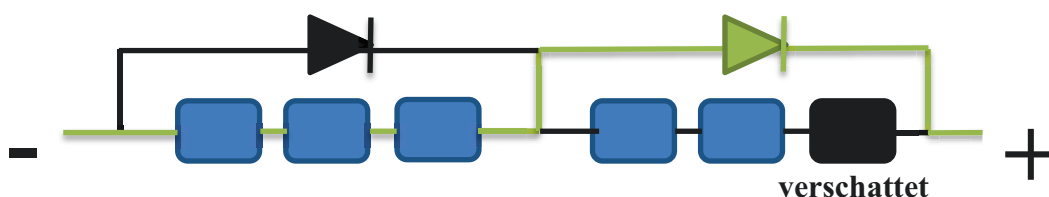


Abbildung 16 Funktionsprinzip Bypass-Diode [3]

Dioden sind Halbleiterelemente und besitzen eine Sperr- und Durchlassrichtung. Die Leitfähigkeit ist abhängig von der Polung an Anode (p-dotiert) und Kathode (n-dotiert) bzw. von der Stromrichtung. Wird ein positives Potential an der Anode und ein negatives an der Kathode angelegt, so ist die Diode leitend (Abbildung 17). Wird die Diode umgepolt, so ist sie nicht leitend und sperrt den Stromfluss. Bei zu hohen Spannungen wird die Sperrschicht der Dioden durchschlagen und ist dann permanent leitend. Bei den verwendeten Modulen ist dieser Fall eingetreten. Die Strings werden dadurch kurzgeschlossen und erzeugen keinen Ertrag mehr. Die Dioden müssen folglich ausgetauscht werden.



Abbildung 17 Schaltzeichen einer Diode [3]

Damit die Diode leitend ist, benötigt sie eine Schwellenspannung. Sie kann an einem Fahrradventil mit dem Schwellendruck, der benötigt wird, um die Rückschlagfeder zu überwinden, verglichen werden. Die Schwellenspannung ist abhängig von der verwendeten Technologie (Tabelle 2) und der Stromdichte. Sie bewirkt einen Spannungsabfall und führt folglich zu Energieverlusten.

Tabelle 2 Übersicht der Schwellenspannung von Dioden [4]

Typ	Schwellenspannung/V
<b>Leistungsdioden</b>	0,4 – 0,5
<b>Body-Dioden von MOS-FET's</b>	0,3 – 0,5
<b>Kleinsignaldioden</b>	0,5 – 0,6
<b>Kapazitätsdioden</b>	0,5 – 0,7

Der Kurzschlussstrom der verwendeten Module beträgt 6,7 A. Es ist üblich mit einem Spannungsabfall von 0,7 V bei Dioden zu rechnen. Folglich können pro Diode maximale Leistungsverluste von 4,69 W erwartet werden (Formel 2).

Formel 2 Berechnung der Verlustleistung einer Diode

$$P_{\text{Verlust}} = U \cdot I = 0,7 \text{ V} \cdot 6,7 \text{ A} = 4,69 \text{ W}$$

Die Rechnung beschreibt den Extremfall und wird in der Praxis selten und meist nur bei defekten Strings bzw. bei falscher Positionierung der Module erreicht. Zur Minimierung dieser Verluste wird bei großen Solarparks vermehrt auf die Technologie der Smart-Bypass-Dioden gesetzt. Diese Technologie wird oft auch als ideale Diode bezeichnet und greift auf eine aktiv MOS-FET Steuerung zurück. Ein MOS-FET kann vereinfacht als elektrischer Schalter betrachtet werden. Bei Anlegen eines Potentials zwischen Gate-Source ist der Source-Drain Kanal leitend.

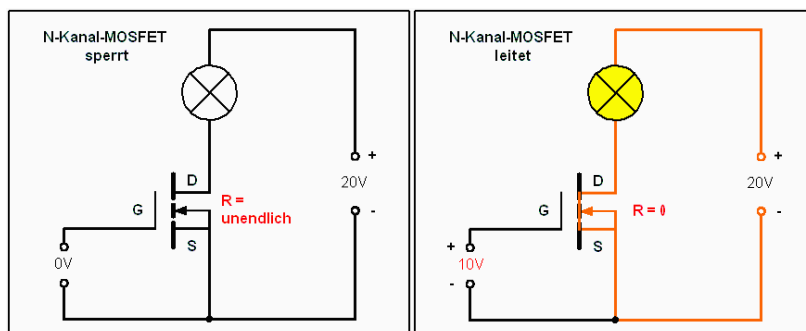


Abbildung 18 Schaltfunktion eines N-Kanal MOS-FETs [3]

Dabei wird das Potential vor und nach dem MOS-FET verglichen und der Transistor wird bei Erfüllung der Bedingung Anoden-Potential > Kathoden-Potential angesteuert. Dadurch sperrt bzw. leitet dieser den Stromfluss, wie eine Diode, an den verschatteten Modulen vorbei. Die Lösung der aktiven MOS-FET Steuerung zeichnet sich durch den geringen Spannungsabfall von einigen Zehntel mV aus. Somit kann der Energieverlust bis zu 1/50 im Vergleich mit Dioden gesenkt werden. Die beiden Technologien Bypass-Diode und „ideale Diode“ sollen am Versuchsstand miteinander verglichen werden. Dazu gibt es von Texas Instruments eine Komplettlösung, die die Ansteuerung sowie den MOS-FET in ein Bauteil umfasst und für Ströme bis zu 15 A geeignet ist. Das Vereinen von komplexen Schaltungen in ein Halbleiterbauteil wird als integrierter Schaltkreis (IC) bezeichnet. Der Aufbau des IC's von Texas Instruments ist in der Abbildung 19 dargestellt.

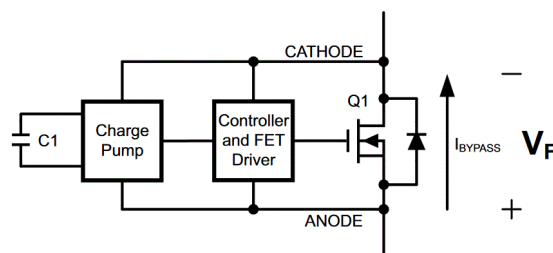


Abbildung 19 Block Diagram SM74611 [11]

Für einen signifikanten Vergleich der beiden Lösungen wurden zwei Strings mit Schottky-Dioden und zwei Strings mit den Smart-Bypass-Dioden von Texas Instruments ausgestattet. Die verwendeten Dioden besitzen eine Schwellenspannung von circa 0,4 V. Die Technologien wurden mit jeweils einem Wechselrichter verknüpft und an den 230 V-AC-Bus implementiert. Der Aufstellort ist, für einen besseren Vergleich neben den Modulen mit einem Anstellwinkel von 30°, auf dem Dach des Garagenkomplexes der Firma ifn Anwenderzentrum GmbH in Lauchhammer (Abbildung 20).



Abbildung 20 Aufbau der Solarmodule [3]

### 5.1.2 Einbindung der diffusen und direkten Strahlung

Die an den Solarpanels umgewandelte Globalstrahlung unterteilt sich in direkte und diffuse Strahlung. Die direkte Strahlung ist dabei der Teil der Globalstrahlung, der ohne auf ein Hindernis zu treffen, den kürzesten und somit direkten Weg von der Strahlungsquelle Sonne zum Einwirkungsort zurücklegt. Die diffuse Strahlung ist der resultierende restliche Anteil der Globalstrahlung, der von Hindernissen gebeugt, reflektiert, absorbiert, gestreut oder gebrochen wird (Abbildung 21).

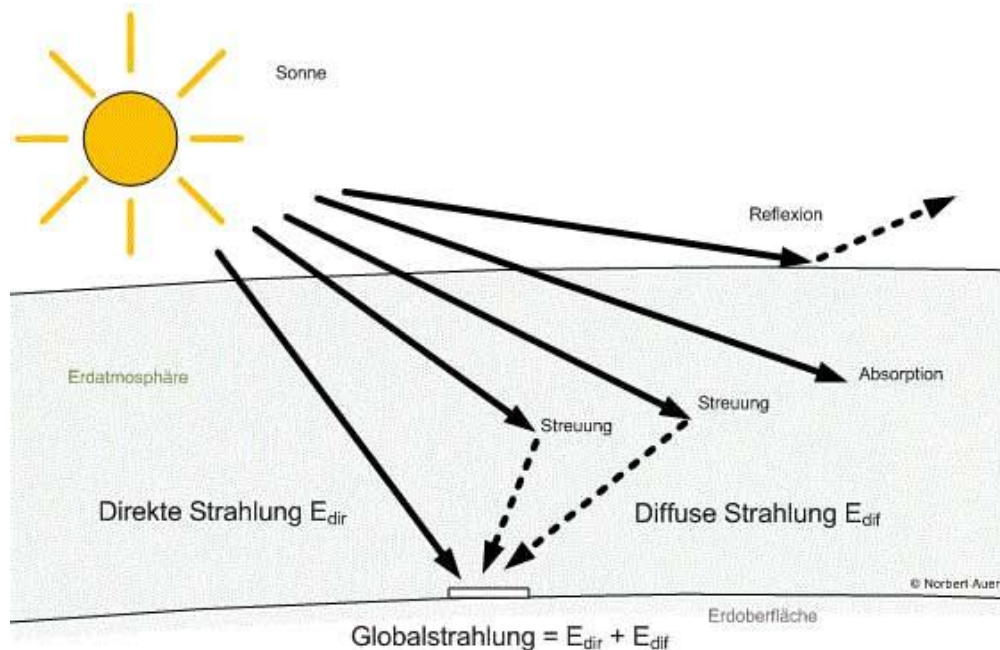


Abbildung 21 Übersicht direkte und diffuse Strahlung [12]

Für eine aussagekräftige Charakterisierung der unterschiedlichen Anstellwinkel der Solarpanels müssen am Versuchsstand die Werte der direkten und diffusen Strahlung mit einbezogen werden. Zur Bestimmung der beiden Strahlungsanteile gibt es einige Messsysteme, die allerdings sehr kostenintensiv oder zu ungenau sind. Um diese Systeme zu umgehen, wird auf das Rechenmodell von Hollands/Orgill zurückgegriffen. Dabei wird die maximal mögliche Strahlung ohne Dämpfung mit Berücksichtigung der Sonnenhöhe, des Sonnenabstandes, der Erdneigung und der geografischen Lage berechnet. Der berechnete Wert wird mit der gemessenen Globalstrahlung ins Verhältnis gesetzt. Daraus ergibt sich ein Klarheitsfaktor, mit dem die Anteile bestimmt werden können. Die Berechnungsreihenfolge nach dem Rechenmodell von Hollands/Orgill ist in den acht Schritten erklärt:

1. Berechnung der maximal möglichen Strahlung ohne Dämpfung mit Berücksichtigung des Sonnenabstandes zur Erde (tagesabhängig).

#### Formel 3

$$E_0^* = E_0 \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{365}\right)\right)$$

Dabei ist  $E_0$  die Solarkonstante, regional gemittelt und mit  $1,367 \text{ kW/m}^2$  parametrisiert.

$n$  ist der Tag in Zahl. Bsp.: 08.04. ist 99.



2. Berechnung des Stundenwinkels  $\omega$ . Dieser beschreibt die Position der Sonne. Es muss darauf geachtet werden, dass die Winterzeit in Stunden eingesetzt wird. Pro Stunde dreht sich die Erde um  $15^\circ$ , da  $360^\circ/24h = 15^\circ$ . Die Sonne erreicht ihren höchsten Meridian um 12 Uhr. Daraus folgt die Formel:

**Formel 4**

$$\omega = (ST - 12) \cdot 15^\circ$$

Im Sommer werden die Uhren um eine Stunde vorgestellt. Die 12 muss für diesen Zeitraum folglich durch 13 ersetzt werden.

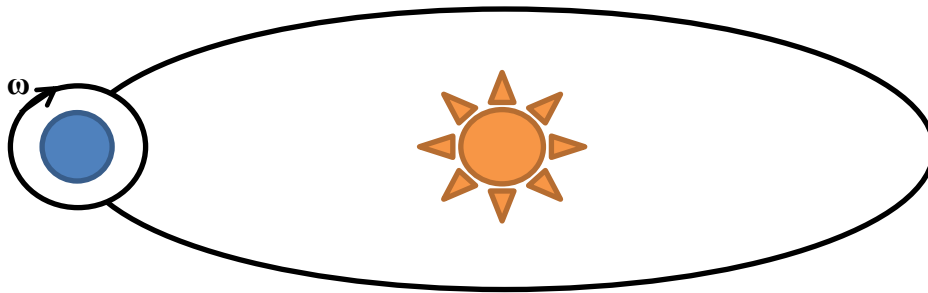


Abbildung 22 Darstellung des Stundenwinkels [3]

3. Berechnung der Erdneigung mit Einbezug des Datums. Dabei beschreibt der Winkel  $\varepsilon = 23,45^\circ$  die Schräge der Ekliptik

**Formel 5**

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (n - 79))$$

n ist wieder der Tag in Zahl. Bsp.: 08.04. ist 99. Der 21.03. ist die Sonnenwende, daher muss der Tag noch mit 79 subtrahiert werden.

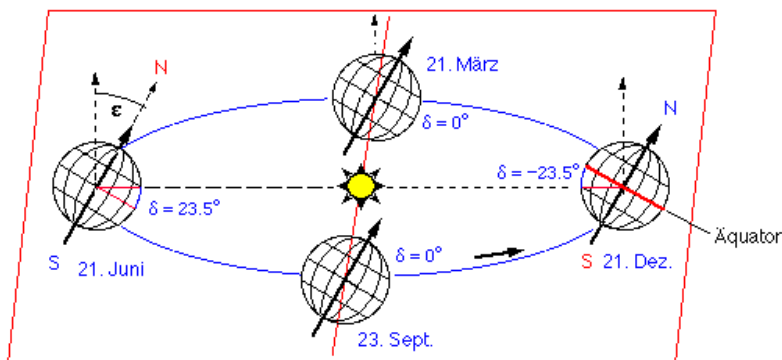


Abbildung 23 Darstellung der Erdneigung [13]

4. Für die Berechnung der zeitlich maximalen Strahlung wird noch die Sonnenscheinhöhe  $h_s$  benötigt. Diese berechnet sich aus dem Stundenwinkel, der Neigung der Erdachse und dem geografischen Breitengrad. Für das ifn Anwenderzentrum in Lauchhammer ist der Breitengrad  $\phi = 51,488^\circ$  (Google maps).

**Formel 6**

$$\sin h_s = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$$

5. Berechnung der maximal möglichen zeitlichen Strahlung ohne Dämpfung (ohne atmosphärische Beeinflussung):

**Formel 7**

$$E_{extr,h_s} = E_0^* \cdot h_s$$

6. Für die Berechnung der diffusen Strahlung wird der Klarheitsfaktor benötigt. Dieser ist ein Indiz dafür, wie klar das Wetter ist (Dämpfung durch Wolken, Nebel etc.) und ist das Verhältnis der gemessenen Globalstrahlung zu der maximal zeitlich möglichen Strahlung ohne Dämpfung.

**Formel 8**

$$k_t = \frac{E_{global}}{E_{extr,h_s}}$$

7. Der Anteil der diffusen Strahlung an der Globalstrahlung lässt sich näherungsweise durch Einbeziehung des Klarheitsfaktors errechnen. Dazu gibt es drei Näherungen, sonniges Wetter ( $k_t > 0,75$ ), heiteres Wetter ( $k_t < 0,75$  und  $k_t > 0,35$ ) und bewölktes/nebliges Wetter ( $k_t < 0,35$ ).

**Formel 9**

$k_t > 0,75$ :

$$E_{dfu,h} = E_{global} \cdot 0,177$$

**Formel 10**

$k_t < 0,75$ ,  $k_t > 0,35$ :

$$E_{dfu,h} = E_{global} \cdot (1,577 - 1,84 \cdot k_t)$$

**Formel 11**

$k_t < 0,35$ :

$$E_{dfu,h} = E_{global} \cdot (1 - 0,249 \cdot k_t)$$

Werden diese Fälle nicht beachtet, dann kommt es zu sehr großen Abweichungen.

8. Die Globalstrahlung setzt sich aus der direkten und diffusen Strahlung zusammen. Somit lässt sich die direkte Strahlung wie folgt berechnen:

**Formel 12**

$$E_{dir,h} = E_{global} - E_{dfu,h}$$

## 5.2 Optimierung der Lade- /Entlade- Steuerung des Akkus

Im Verlauf der Arbeit kristallisierten sich bei der Umschaltlösung mittels der entwickelten Schalttafel der BTU C-S einige Defizite heraus. Ein Neuparametrieren der Schaltschwellen war nur mit langen Wartezeiten und Verzicht der Tafel verbunden, da dies nicht vor Ort geschehen konnte. Des Weiteren ist der Laderegler unterdimensioniert und bereitet einige technische Probleme. Dazu zählen die nicht korrekte Ladeschlussspannung, ein Verflüchtigen der programmierten Einstellungen sowie ein nicht nachkonstruierbares Problem, bei dem der Laderegler im Standby-Status verharrte. Des Weiteren

stellte sich die Implementierung der Messwerte mit der Beckhoff-Steuerung und somit das Speichern der Daten in der Datenbank als zu aufwändig heraus. Für eine aussagekräftige Auswertung, einen reibungslosen Ablauf und eine zuverlässige Funktion ist eine Eigenentwicklung mit Integration der Beckhoff-Steuerung folglich unausweichlich.

### 5.2.1 Systembeschreibung und Aufbau

Für eine flexible Lösung müssen die Schaltvorgänge sowie das Auswerten der Messwerte zentral von der Beckhoff-Steuerung übernommen werden. Um das zu ermöglichen, werden die beiden Anforderungen in zwei Teilsysteme unterteilt, die Messwertaufbereitung und die Leistungselektronik.

Die Leistungselektronik unterteilt sich in einen DC Bus (Abbildung 24 blau) sowie in einem AC Bus (Abbildung 24 orange), wobei auf eine Trennung der Netzsynchronen sowie der Insel-Wechselrichter im AC Bus geachtet werden muss. Bei Nichtbeachten der asymmetrischen Signale kommt es ansonsten zu Schäden an den Geräten. Um dies zu verhindern, wurden ein Netzfilter und eine Schaltverzögerung mitintegriert. Des Weiteren muss eine mechanische Verriegelung miteinbezogen werden. Dies bewerkstelligt, dass nie beide Systeme zur gleichen Zeit geschaltet sind.

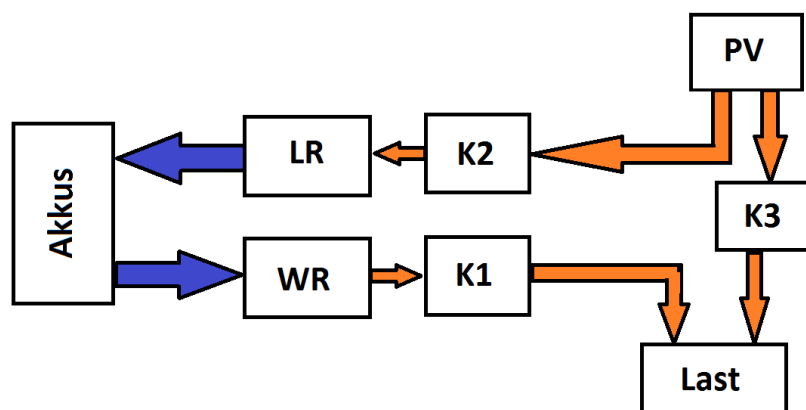


Abbildung 24 Schema Energieumschaltung [3]

Um das Schaltschema zu realisieren, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung, die Lösung über eine Relaisplatine oder die Relais mit Leitungen zu verknüpfen. Die Verknüpfung mit Leitungen ist ohne größeren Aufwand realisierbar und verbindet die Komponenten, auch bei einer dezentralen Lokalität, simpel. Allerdings ist sie unübersichtlich und benötigt viel Platz. Eine Relaisplatine zu fertigen und zu entwickeln ist zwar aufwändig, aber sie zentralisiert die Verknüpfungen zu einem Knotenpunkt, ist übersichtlich und sehr kompakt. Ohne Einbeziehung der Arbeitskosten ist sie auch billiger. Auf Grund dieser Fakten fällt die Wahl auf die Entwicklung und Fertigung einer Relaisplatine.

Die verwendeten Wechselrichter bieten die Möglichkeit, die jeweiligen Spannungen und Ströme über einen Bus auszulesen. Folglich muss nur noch die Lade- und Entladeleistung an den Akku erfasst werden. Die eingebaute SPS besitzt eine Klemme mit, der eine Spannung oder Strommessung möglich ist. Da die Strommessung unipolar (nur in eine Richtung) möglich ist, werden für die Messung allerdings drei Kanäle benötigt, die Akkuspannung, der Ladestrom und der Entladestrom. Die verbaute Digitalmultimeterklemme hat einen Wertebereich von 0-300 V und 0-10 A. Der Spannungsbereich ist ausreichend, der Strombereich allerdings nicht, da er auf Grund der Akkuspannung von 12 bis 14,6



Volt nur für Leistungen bis zu circa 135 Watt ausreichend wäre. Als Alternative wurde die Klemme 3064 von Beckhoff gewählt. Diese besitzt vier analoge Eingänge und kann Werte zwischen 0 bis 10 Volt erfassen. Das Datenblatt ist dem Anhang IV zu entnehmen. Die Strommessung erfolgt mittels Hall-Effekt-Sensoren und eines Spannungsteilers (Abbildung 25). Die Komponenten werden in dem folgenden Kapitel genauer beschrieben.

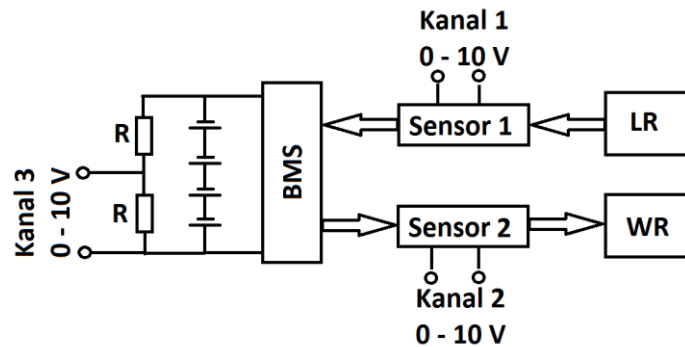


Abbildung 25 Schema des Messaufbaus [3]

### 5.2.2 Beschreibung der Komponenten

Die Entwicklung der Relaisplatine erfolgt über das Programm EAGLE. Als erster Schritt muss ein Schaltplan erstellt werden (Abbildung 26).

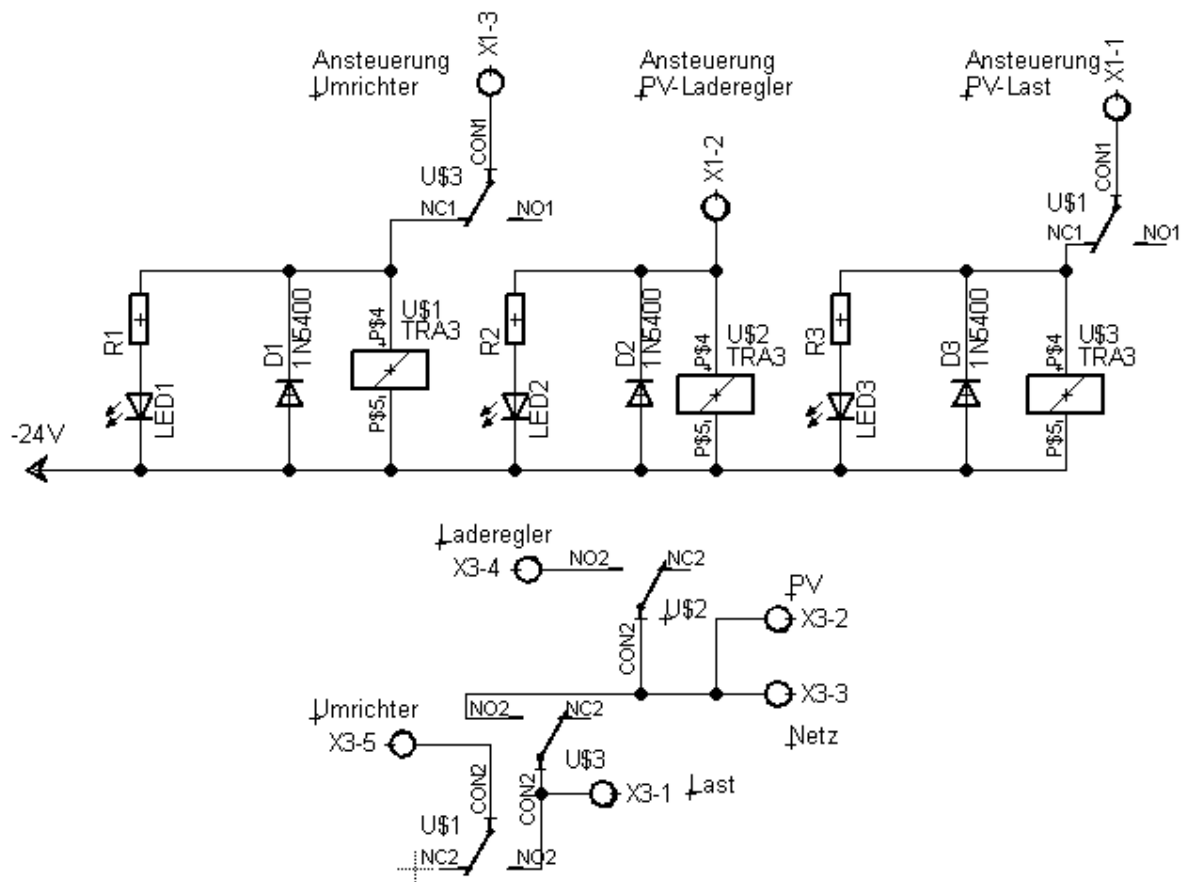


Abbildung 26 Schaltplan Relaisplatine in EAGLE [3]

U\$1 ist hierbei für den Umrichter vom Akku, U\$2 ist für das Laden des Akkus und U\$3 ist für das Relais für die Versorgung der Last mit Solarenergie verantwortlich. Die mechanische Verriegelung der Relais wird direkt auf der Relaisplatine vorgenommen. Beim Öffnen des Schaltkontaktes entstehen durch Induktion der Spule hohe Spannungen und können Bauteile beschädigen. Durch antiparalleles Verschalten von Schottky-Dioden wird diese Spannung auf die Schwellenspannung der Diode begrenzt. Das Funktionsprinzip dazu ist in Abbildung 27 dargestellt. Des Weiteren ist eine Visualisierung des Schaltstatus mit Hilfe von LED's realisiert worden.

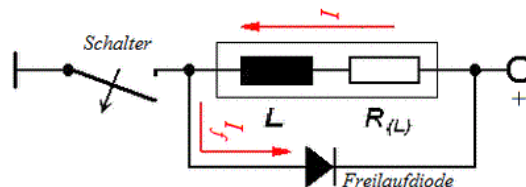


Abbildung 27 Funktionsprinzip einer Freilaufdiode [3]

Nach Erstellen des Schaltplanes und Zuweisen der Bauformen der jeweiligen Komponenten erfolgt das Layouten der Platine. Dazu werden die Bauteile günstig zum Verbinden platziert und anschließend verbunden. Das Platinen-Layout ist dem Anhang V zu entnehmen. Die Fertigung erfolgt über die Tonertransfermethode. Dabei wird das Platinen-Layout mit einem Laserdrucker auf ein Papier mit glatter Oberfläche gedruckt und mit Einwirkung von Hitze auf die Platine transferiert. Die Druckerfarbe dient als Schutzschicht für die folgende Ätzung. Mit Eisen-(III)-Chlorid werden die freien Flächen weggeätzt, so dass nur die Leiterbahnen und Pads für die Bauteile übrig bleiben. Das Bohren, Bestücken und Löten erfolgt per Hand. Die fertige Platine wird anschließend in einem Anschlusskasten montiert. Dieser dient als zusätzliche Isolierung, an dem der Netzfilter montiert wird.



Abbildung 28 Akkumanagement mit Netzfilter [3]

Der in Reihe zum Wechselrichter des Akkus geschaltete Netzfilter ist notwendig, um Störspannungen zu verhindern. Er ist, wie ein Tiefpass, aus Induktivitäten und Kondensatoren aufgebaut.

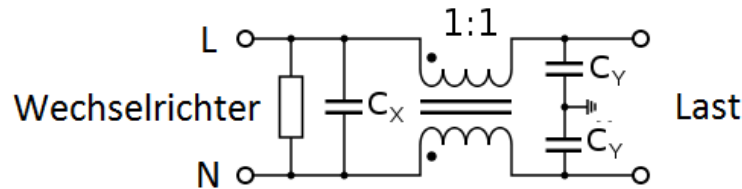


Abbildung 29 Schaltplan eines Netzfilters [3]

Der verwendete Netzfilter besitzt eine stromkompensierte Drossel, einen Kondensator  $C_x$ , der zwischen dem Außenleiter L und dem Neutralleiter N geschaltet ist, und Kondensatoren  $C_y$ , die jeweils zwischen L und Erde bzw. zwischen N und Erde verschaltet sind. Die stromkompensierte Drossel unterdrückt asymmetrische Störströme zwischen L und N. Die Drossel besitzt gleichsinnige Wicklungen, die auf einen gemeinsamen Eisenkern gewickelt sind. Bei gleichen Strömen heben sich die magnetischen Felder im Eisenkern auf. Kommt es allerdings zu einer Asymmetrie, so steigt der induktive Widerstand und der asymmetrische Störstrom wird unterdrückt. Die Kondensatoren  $C_x$  und  $C_y$  dienen zur Dämpfung von Störspannungen zwischen den Zuleitungen bzw. zur Erde.

Der in den Akkus gespeicherte Gleichstrom muss mit einem Wechselrichter auf einen Wechselstrom mit einem Potential von 230 Volt gewandelt werden. Das System muss eigenständig ohne Netzfrequenz arbeiten. Für diese Anforderungen wurde ein Wechselrichter für Insellösungen mit einer Leistung von 300 Watt bestellt. Dieser kann auch kurzzeitig eine Leistung von bis zu 600 Watt bereitstellen. Die technischen Daten sind in der Tabelle 3 dargestellt. Die Leistung von 300 W ermöglicht Simulationen von bis zu 12 kW. Einschaltvorgänge lassen sich mit der Spitzenleistung von 600 W abfangen.

Tabelle 3 Technische Daten Wechselrichter [14]

Hersteller	Voltcraft
Typ	MSW 300-12-G
Frequenz	50 Hz
Leistung	300 W
Spitzenleistung	600 W
Wirkungsgrad	85%
Ausgangsspannung	230 V/AC
Eingangsspannung	10,5 - 15 V/DC
Signalart	modifizierte Sinuswelle



Abbildung 30 Wechselrichter [14]

Zum Laden der Akkus wird ein Laderegler benötigt, der die von der PV-Anlage ankommenden 230 Volt AC zu Gleichstrom gleichrichtet und die Akkus mit einem CCCV-Verfahren auflädt (Abbildung 31). Bei diesem Ladeverfahren werden die Zellen mit einem konstanten Strom ( $I_1$  Abbildung 31) geladen. Nach dem Erreichen der Ladeschlussspannung von 14,6 Volt (vier Zellen á 3,65 Volt) wird die Spannung konstant gehalten ( $V_2$  Abbildung 31), der Ladestrom sinkt unter

Abhängigkeit der Zeit ( $I_2$  Abbildung 31) und der Ladevorgang wird nach dem Erreichen eines minimalen Schlussstroms ( $I_3$  Abbildung 31) beendet. Der Schlussstrom ist abhängig vom Ladegerät und beträgt oft 5 % vom maximalen Ladestrom. Beim Erreichen der Ladeschlussspannung fließen geringere Ströme, so kann das BMS die Zellen besser ausbalancieren.

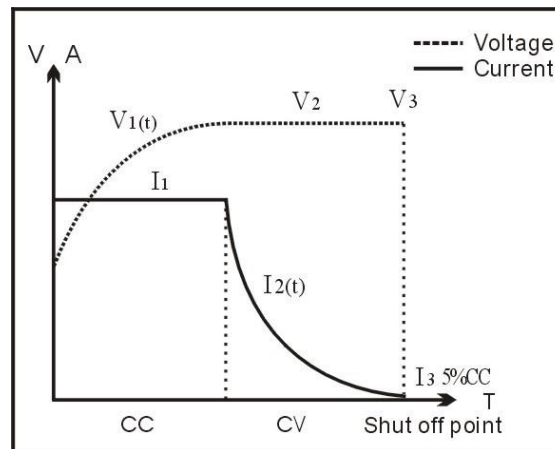


Abbildung 31 Kurvenverlauf des CCCV-Ladeverfahrens

Die Wahl fiel auf einen Laderegler der Firma i-tecc. Dieser hat einen maximalen Ladestrom von 25 Ampere und somit eine Ladeleistung von 300 Watt. Der Laderegler ist speziell für LiFePO<sub>4</sub>-Akkus. Die technischen Daten sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Technische Daten des Ladereglers [8]

<b>Hersteller</b>	<b>i-tecc</b>
<b>Betriebsspannung</b>	230 VAC
<b>Ladeschlussspannung</b>	14,4 V
<b>Ladestrom</b>	25 A
<b>Ladetechnik</b>	CC, CV
<b>Anschlüsse</b>	Anderson PP15-45
<b>Zellen</b>	für 4S LiFePO4



Abbildung 32 Laderegler der Firma i-tecc [8]

Die Messwertumformung erfolgt zentral auf einer Platine. Die Analogeingangsklemme ist für Spannungen bis zu 10 Volt ausgelegt, die maximale Akkuspannung erreicht allerdings eine Spannung bis zu 14,6 Volt. Zum Anpassen des Wertebereiches wird auf einen Spannungsteiler zurückgegriffen. Dieser skaliert bei  $R_1 = R_2$  die Akkuspannung auf ein Verhältnis von circa 1:2.

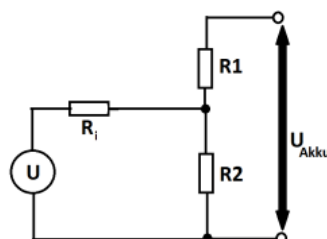


Abbildung 33 Schaltung zur Spannungsmessung [3]

Bei der Dimensionierung muss der Innenwiderstand  $R_i$  von der Beckhoff-Klemme mit in Betracht gezogen werden. Dieser liegt parallel zum Widerstand  $R_2$  und beeinträchtigt somit diesen und den gemessenen Spannungsabfall. Um Messfehler zu verringern, werden die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  zehnmal kleiner gewählt als der Innenwiderstand  $R_i$  des Messmoduls und eine Anpassung des Skalierungsfaktors wird vorgenommen. Da der Widerstand  $R_1$  zu dem Innenwiderstand und dem Widerstand  $R_2$  in Reihe verschaltet ist, setzt sich die Akkuspannung wie in Formel 13 zusammen.

#### Formel 13

$$U_{Akku} = U_1 + U_{mess}$$

In einer Reihenschaltung ist der Strom immer gleich, folglich ergibt sich das Verhältnis:

#### Formel 14

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_{mess}}{(R_2^{-1} + R_i^{-1})^{-1}}$$

Formel 14 nach  $U_1$  umstellen und in die Formel 13 eingesetzt, ergibt:

#### Formel 15

$$U_{Akku} = U_{mess} \cdot \left( \frac{R_1}{(R_2^{-1} + R_i^{-1})^{-1}} + 1 \right) = U_{mess} \cdot \left( \frac{10 \text{ k}\Omega}{(10 \text{ k}\Omega^{-1} + 130 \text{ k}\Omega^{-1})^{-1}} + 1 \right) = U_{mess} \cdot 2,08$$

Der Skalierungsfaktor beträgt folglich 2,08.

Die Strommessung erfolgt mit Hilfe eines auf den Hall-Effekt basierenden linearen Sensors von Allegro. Der Hall-Effekt ist das Auftreten einer elektrischen Spannung an einem stromdurchflossenen Leiter. Die durch den Strom erzeugte Hall-Spannung wird im IC gefiltert und linearisiert.

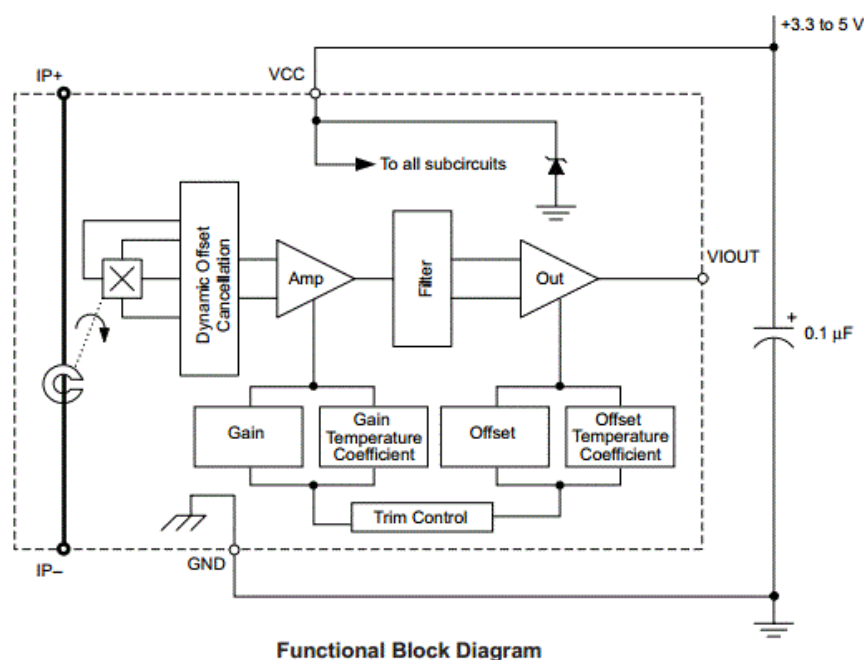


Abbildung 34 Funktions-Diagramm des Stromsensors [11]

Der Sensor zeichnet sich durch seine sehr hohe Genauigkeit, durch die sehr geringe Linearisierungsabweichung und seinen sehr geringen Eigenverbrauch aus. Bei der Berechnung des Stroms muss der Offset (600 mV) des Sensors vom gemessenen Wert abgezogen werden und der resultierende Wert durch die Auflösung von 60 mV/A geteilt werden (Formel 16).

**Formel 16**

$$I = \frac{U_{mess} - Offset}{Auflösung} = \frac{U_{mess} - 600 \text{ mV}}{60 \text{ mV/A}}$$

Zum Erreichen der hohen Genauigkeit und folglich geringen Linearisierungsabweichung benötigt der IC eine stabile Spannungsversorgung. Dazu wird möglichst nah am Bauteil ein 100 nF Elektrolyt-Kondensator  $C_{BYP}$  parallel verschaltet (Abbildung 35). Dieser dient als Glättung von möglicher Restwelligkeit sowie als Puffer der Spannungsversorgung. Parallel zum Ausgang wird ein Kondensator  $C_F$  verschaltet (Abbildung 35). Dieser wird mit einem Vorwiderstand  $R_F$  geladen und dient zur Mittelwertbildung. Je größer der Vorwiderstand, desto träger wird der Mittelwert gebildet und starke Schwankungen werden dadurch geglättet.

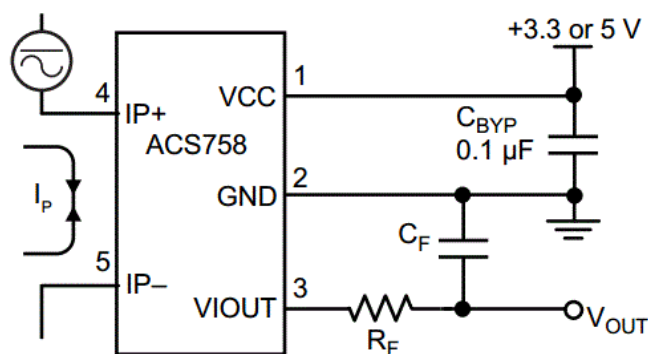


Abbildung 35 Schaltschema des Stromsensors [11]

Die Stromsensoren benötigen eine stabile Spannungsversorgung von 5 Volt. Um dies zu bewerkstelligen, wird ein linearer Festspannungsregler benutzt. Dieser wandelt die Spannung des Akkus auf eine konstante Spannung von 5 Volt. Der Wirkungsgrad ist abhängig vom Niveauunterschied, da die überschüssige Spannung in Wärme umgewandelt wird. Die zwei Sensoren benötigen allerdings nur einen Maximalstrom von zusammen 6 mA<sup>2</sup>. Dadurch entsteht eine Verlustleistung in Form von Wärme von:

**Formel 17**

$$P_{verlust} = (U_{Akku} - U_{Out}) \cdot I = (14,6 \text{ Volt} - 5 \text{ Volt}) \cdot 6 \text{ mA} = 57,6 \text{ mW}$$

Bei dieser geringen Wärmeleistung wird keine aktive bzw. passive Kühlung des Bauteils benötigt.

Die drei Teilsysteme zur Spannungsmessung und Strommessung werden zusammen auf einer Platine verschaltet. Die Entwicklung erfolgt wieder mit der Software Eagle und die Fertigung mit den gleichen Verfahren wie bei der Relaisplatine. Das Layout ist in Abbildung 36 dargestellt.

<sup>2</sup> Siehe Datenblatt <http://www.allegromicro.com/Products/Composition.aspx?PN=ACS758LCB-050U-PFF-T>



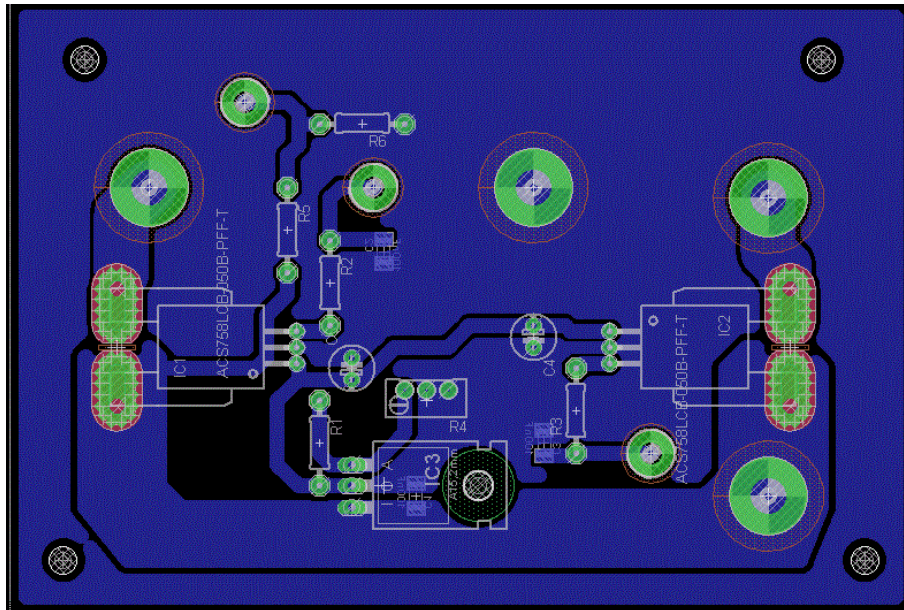


Abbildung 36 Layout der Messumformungsplatine [3]

Die Unterbringung der Platine erfolgt in einer Abzweigdose. Diese isoliert das System vor Verschmutzungen und Fremdkörpern sowie vor Berührungen.

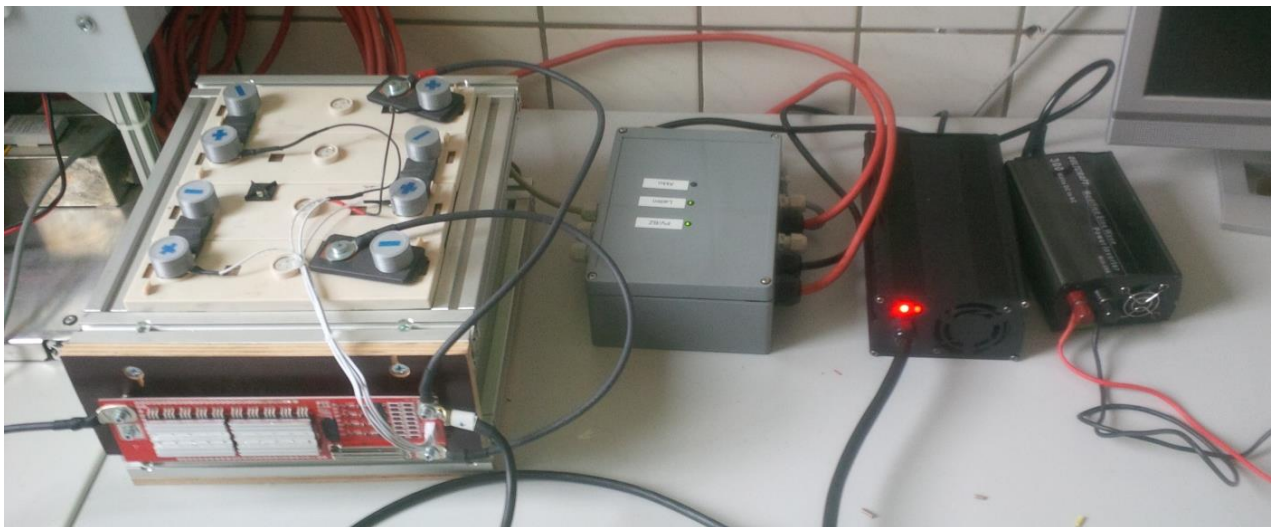


Abbildung 37 komplettes Akkumanagementsystem [3]

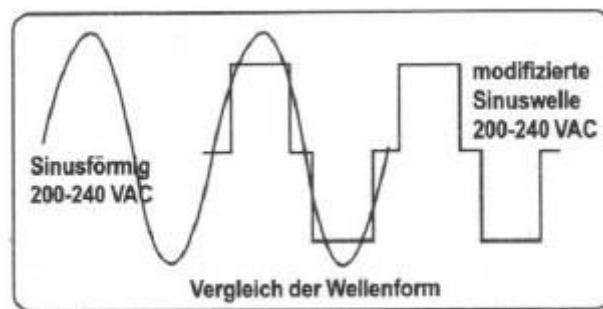
### 5.2.3 Variantenvergleich und Beurteilung der Lösungen

Zum Beurteilen des entwickelten Systems wird es mit der entwickelten Lösung des Bündnispartners BTU C-S verglichen. Dazu dient ein Variantenvergleich, bei dem unterschiedliche Kriterien bewertet und verglichen werden. Die Bewertung erfolgt in drei Stufen, wobei 1 nicht ausreichend, 2 gelungen und 3 sehr gelungen entspricht.

**Tabelle 5 Variantenvergleich der Systeme**

Kriterium	Schalttafel	eigene Lösung
Wechselrichter des Akkus	3	2
Laderegler des Akkus	1	3
Visualisierung der Messwerte	3	2
Einbindung der Messwerte zur Steuerung	1	3
Darstellung der Schaltzustände	3	3
Änderung der Schaltparameter	1	3
<b>Ergebnis</b>	<b>12</b>	<b>16</b>

Die verwendeten Wechselrichter von der Schalttafel und der eigenen Lösung unterscheiden sich nicht von der Leistung sowie von der maximal kurzfristig möglichen Leistung. Allerdings gibt es einen großen Unterschied zur Aufbereitung des Ausgangssignals. Der von der Schalttafel verwendete Wechselrichter besitzt ein reines Sinussignal und der in der eigenen Lösung ein modifiziertes. Der Unterschied ist in der Abbildung 38 dargestellt. Bei einem modifizierten Sinussignal wird mit Hilfe einer Rechteckspannung das Sinussignal imitiert. Die im Netzfilter verbauten Kondensatoren versuchen die Abstufungen zu glätten, dadurch entsteht die sogenannte Brummspannung. Diese führt zu einem geringen Energieverlust und zu einem akustischen Arbeiten des Systems. Aus diesem Grund wurde das System mit „gelungen“ und die Schalttafel mit „sehr gelungen“ beurteilt.



**Abbildung 38 Vergleich reine und modifizierte Sinuswelle**

Der in der Schalttafel verbaute Laderegler hat eine zu geringe Ladeleistung und wies einige technische Probleme auf. Die eigene Lösung beinhaltet einen größeren Laderegler und bereite im Verlauf keine Probleme. Daher wurden die Lösung der Schalttafel mit 1 und die der eigenen mit 3 bewertet.

Die Visualisierung der Messwerte erfolgt bei der Schalttafel direkt über die jeweiligen Digitalanzeigen oder ist auch mit aufwendigem Umformatieren an der Beckhoff-Steuerung möglich. Das umformatieren der Messwerte wird allerdings bei der Bewertung vernachlässigt. Die Darstellung der Messwerte erfolgt bei der eigenen Lösung nur von der Beckhoff-Steuerung. Dies führt zu einer Abstufung der Bewertung von 3 Punkten für die Schalttafel zu 2 für die eigene Lösung.

Bei der eigenen Lösung wurde großer Wert auf einer flexiblen Einbindung der Messwerte in die Steuerung gelegt. Dazu muss das System nur angeschlossen und die Werte müssen umgerechnet werden. Eine Einbindung der Messwerte aus der Schalttafel ist allerdings recht aufwändig, da die Signale erst aufbereitet und umgeformt werden müssen. Dieses Kriterium begründet die Bewertung von 1 Punkt für die Schalttafel und 3 für die eigene Lösung.



Die Darstellung der jeweiligen Schaltzustände wurde bei beiden Systemen sehr gut gelöst. Sowohl bei der Schalttafel, als auch bei der eigenen Lösung werden die Zustände von Relais optisch signalisiert. Daher bekommen beide Systeme 3 Punkte und werden als sehr gelungen beurteilt.

Ein großes Manko der Schalttafel ist das Ändern der Systemparameter. Dazu muss diese erst eingeschickt werden und dies führt zu langen Ausfallzeiten. Das Ändern der Schaltparameter lässt sich dagegen leicht bei der eigenen Lösung vornehmen. Dazu müssen nur die Werte in der Beckhoff-Steuerung geändert werden. Folglich wird das System mit 3 Punkten und somit mit einem sehr zufrieden und die Schalttafel mit 1 Punkt als nicht ausreichend beurteilt.

Unterm Strich erweist sich die eigene Lösung als klarer Gewinner im Vergleich mit der Schalttafel. Die Defizite bei der Visualisierung der Messwerte können in Kauf genommen werden. Der Nachteil des Wechselrichters wird durch Tauschen der Komponenten kompensiert.

### 5.3 Brennstoffzelle

Die von der BTU C-S zur Verfügung gestellte Brennstoffzelle ist eine PEMFC von Heliocentris mit offenem Kathodenraum und den Parametern:

Tabelle 6 Technische Daten der Brennstoffzelle [10]

Hersteller	Heliocentris
Typ	Nexa 1200
Nennleistung	1200 W
Ausgangsspannung	26 - 40 V/DC
Ausgangsstrom	max. 60 A
Brennstoff	Wasserstoff
Eingangsdruck	1 – 15 bar
Wirkungsgrad	50 %



Abbildung 39 Heliocentris Nexa 1200 [10]

Da das vorhandene System während einer längeren Zeit gelagert und nicht in Benutzung war, muss die Anlage auf Funktion und Leistung getestet werden. Der Aufbau des Versuchsstandes ist in Abbildung 40 schematisch dargestellt. Der blau gezeichnete Teil beschreibt hierbei den Wasserstoffbereich und der orangene Teil den elektrischen Bereich.

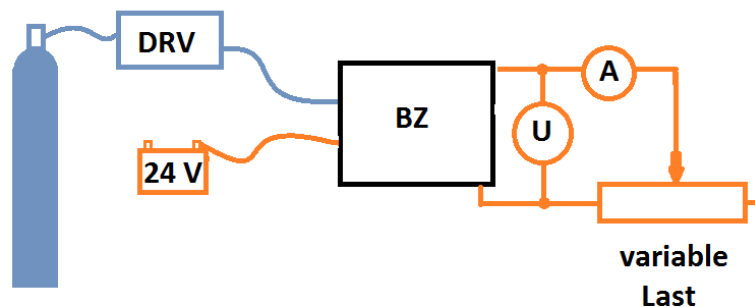


Abbildung 40 Versuchsstand Brennstoffzelle [3]

Der Wasserstoff ist in einer Flasche mit einem Betriebsdruck von 200 bar gespeichert. Dieser Druck ist für das System zu hoch, daher muss er mit einem Druckregelventil (DRV) auf ein Niveau zwischen 1 bis 15 bar gesenkt werden. Der Druck wurde auf 4 bar eingestellt. Zur Inbetriebnahme und zum Starten wird eine externe Spannungsversorgung benötigt. Sobald das System initialisiert wurde und betriebsbereit ist, versorgt sich die Anlage selbst über die Brennstoffzelle und die externe Versorgung wird nicht mehr in Anspruch genommen. Zur Beurteilung des Zustandes der Brennstoffzelle wird als Indikator die Leistung des Systems experimentell ermittelt. Dazu wird am Ausgang ein variabler Widerstand angeschlossen und die Spannung sowie der Strom gemessen.

Bei der Erstinbetriebnahme kam es zu erheblichen technischen Problemen. Sobald das System gestartet wurde, ging die Steuerung in den Fehlerstatus. Ein Auslesen des Fehlers war nicht möglich, da keine Kommunikation zur Steuerung aufgebaut werden konnte. Eine Kontaktierung und gemeinsame Fehlersuche mit dem technischen Support ergaben auch keinen Erfolg. Als letzte Lösung wurde ein Einschicken der Brennstoffzelle angeboten. Dies würde aber hohe Kosten mit sich bringen,

da das System nicht mehr in der Gewährleistungsfrist liegt. Eine weitere Alternative ist das Entwickeln einer eigenen Steuerung. Dazu wird das vorhandene System in dem folgenden Kapitel analysiert und in den darauf folgenden eine eigene Lösung entwickelt und gefertigt. Die Vorteile dieser Lösung sind die flexible Anpassung und Einbindung an die Anforderungen für den Versuchsstand sowie hohe Kosteneinsparungen.

### 5.3.1 Aufbau des Systems und Komponentenspezifizierung

Im Herzen des Systems ist ein Brennstoffzellen-Stack der Firma Ballard eingebaut. Die 40 Zellen des Typs FCgen-1020ACS besitzen einen offenen Kathodenraum und wurden in einem Anstellwinkel von 15° im Gehäuse verbaut. Dahinter befindet sich ein Lüfter, der für die Luftversorgung, zum Abtransport des gasförmigen Wassers und zur Kühlung des Systems benötigt wird.

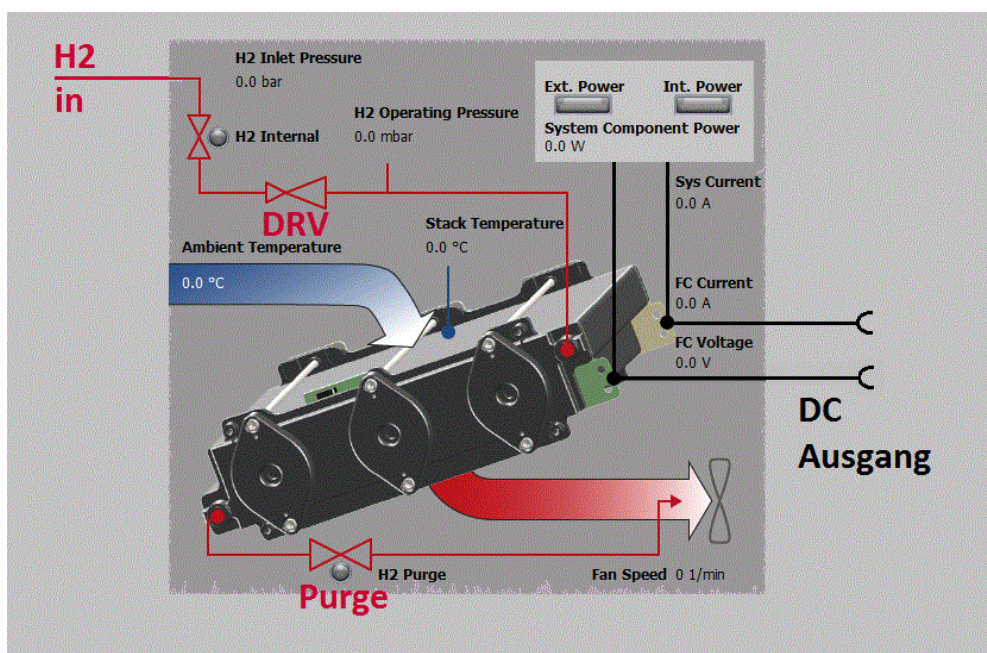


Abbildung 41 Schema des Brennstoffzellensystems [3]

Der Stack wird im death end betrieben. Das System wird, sobald das Hauptventil geöffnet wird und das Druckregelventil DRV im Brennstoffzellen-System den Druck auf den eingestellten Wert regelt, mit Wasserstoff versorgt. Mit Hilfe des Purge-Ventils können die Zellen mit Wasserstoff gespült werden. Es gibt mehr Sensoren, die zur Überwachung des Systems dienen. Dazu zählen Drucksensoren vor und nach dem DRV, Temperatursensoren am Stack und ein Übertemperaturschalter unter dem Stack. Die Spannung und der Strom vom Stack wurden von Sensoren auf der Steuerplatine gemessen und müssen folglich durch eine eigene Lösung ersetzt werden. Eine Überwachung des Wasserstoffgehaltes in der Abluft wird von einem Wasserstoffsensor im Gehäuse des Lüfters übernommen. Bei einer Wasserstoffkonzentration größer als 1 % in der Abluft muss die Steuerung das System abschalten.



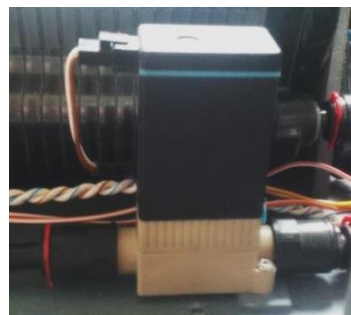
**Abbildung 42 Brennstoffzellen-Stack Draufsicht [3]**

Das Druckregelventil kann für Eingangsdrücke bis 25 bar verwendet werden. Der Betriebsdruck wird mit einer Schraube, die eine Feder spannt, eingestellt. Für das System wird ein Druck von 0,4 bar eingestellt. Dieser Druck hat sich aus durch experimentelle Versuche als optimal herausgestellt. Der Druck ist ausreichend, um eine Unterversorgung der Zellen zu vermeiden und nicht zu hoch für eine zu hohe Diffusion vom Wasserstoff aus dem System.



**Abbildung 43 DRV im Brennstoffzellensystem [3]**

Das Hauptventil und das Purge-Ventil benötigen eine Betriebsspannung von 24 Volt DC und sind stromlos im geschlossenen Zustand. Das Hauptventil kann Drücke von bis zu 15 bar schalten. Das limitiert somit den Eingangsdruck auf maximal 15 bar. Das Purge-Ventil ist für geringere Drücke bis zu 1 bar ausgelegt und ist dadurch kompakter.



**Abbildung 44. Purge-Ventil der Brennstoffzelle [3]**

Der verbaute Lüfter von der Firma ebmpapst ist für Spannungen bis 28 Volt ausgelegt, er ermöglicht einen maximalen Volumenstrom von 430m<sup>3</sup>/h. Das Datenblatt kann dem Anhang VI entnommen werden.

Die Drehzahl und folglich der Volumenstrom lässt sich mittels einer Pulsweitenmodulation steuern. Eine Pulsweitenmodulation ist eine Anreihung von Einschalt- und Ausschaltsignalen in einer konstanten Frequenz (Abbildung 45), bei dem die Zeiten variiert werden.

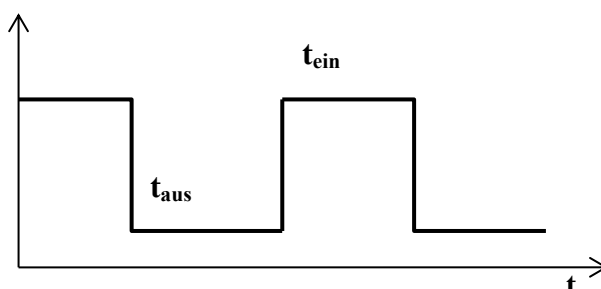


Abbildung 45 Darstellung PWM [3]

Die in der Lüftersteuerung integrierte Elektronik benötigt eine PWM-Frequenz zwischen 1 bis 100 kHz. Dabei entspricht 100% PWM, also ein dauerhaftes Einschaltsignal, 100% der Drehzahl. Die dazu nötige Ansteuerung sowie der Anschluss am Lüfter sind in Abbildung 46 dargestellt. Am Anschluss 2 lässt sich die Ist-Drehzahl auslesen.

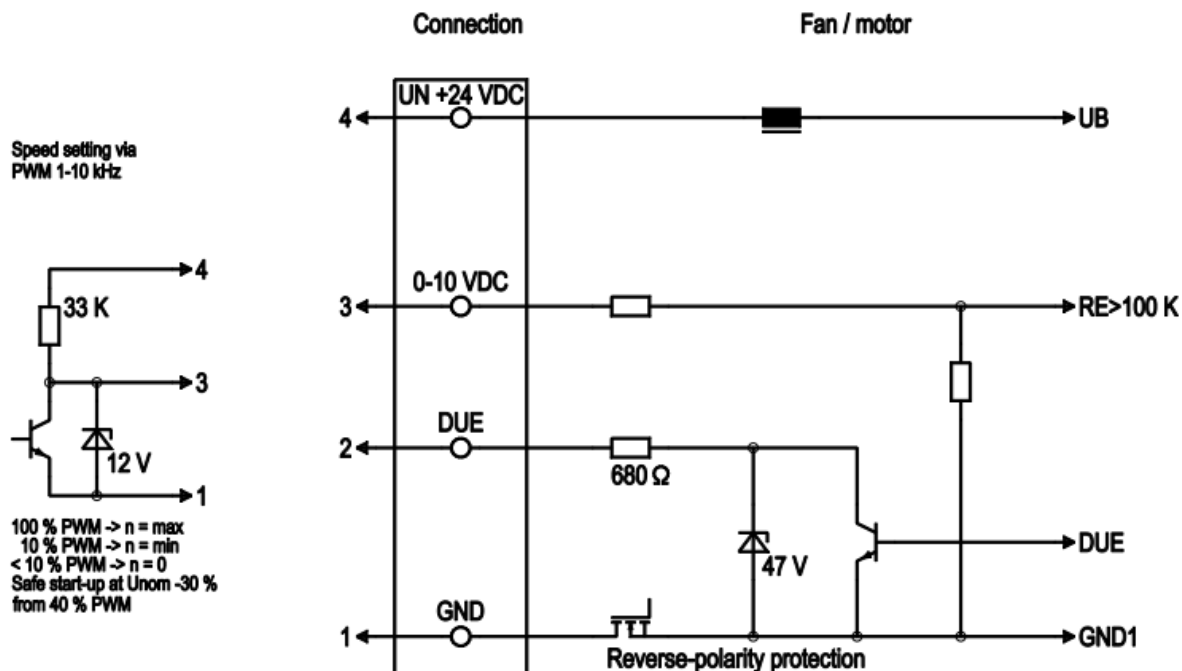


Abbildung 46 Anschluss zur PWM-Steuerung des Lüfters [17]



Als Schutzeinrichtung wurde im System ein Wasserstoffsensor der Firma Neodym Technologies Inc. eingebaut. Der Sensor wird benötigt, um das System bei einem Wasserstoffgrenzwert in der Luft  $> 1\%$  abzuschalten. In diesem Fall wird ein Relais angesteuert und die Auswertung kann über einen Wechselkontakt erfolgen. Des Weiteren bietet der Sensor die Möglichkeit die aktuelle Wasserstoffkonzentration als Analogwert auszugeben. Da diese Funktion aber nicht benötigt wird, wird darauf nicht genauer eingegangen.



Abbildung 47 H2 Sensor im Lüfter-Gehäuse [3]

### 5.3.2 Entwicklung einer Brennstoffzellensteuerung

Zum Steuern und Auswerten sowie zum Überwachen des Systems wird eine Steuerung benötigt. Dazu gibt es mehrere Varianten. Es besteht die Möglichkeit, die Ansteuerung der Komponenten und Auslesung der Sensoren sowie der Schalter über die Beckhoff-Steuerung zu lösen. Dies würde aber einen mit Kosten verbundenen Arbeitsaufwand des zur Programmierung zuständigen Personals beanspruchen. Des Weiteren müssten dazu weitere teure Systemkomponenten zur Steuerung angeschafft werden und der Verkabelungsaufwand zur dezentralen Steuerung wäre sehr groß. Diese Lösung würde den Kostenrahmen sprengen. Eine weitere Möglichkeit ist die analoge Steuerung. Dazu wird die Steuerung und Überwachung nur von logischen Verknüpfungen realisiert. Dies minimalisiert die Steuerung auf die notwendigsten Schaltungen und ist daher sehr kompakt und effizient. Allerdings ist sie sehr komplex, mit sehr hohem Entwicklungsaufwand verbunden und ein Ändern der Einstellungen ist ziemlich umständlich. Ein Kompromiss zwischen den beiden Lösungen ist die Verwendung eines Mikrocontrollers. Dieser kann kompakt und zentral in das System eingesetzt werden. Die Änderung von Systemparametern kann sehr leicht durch Programmänderungen im Mikrocontroller vorgenommen werden.

Die Auswahl an Mikrocontrollern auf dem Markt ist sehr groß. Nach einem Vergleich der Systeme fiel die Wahl auf den Arduino Mega2560. Dieses System ist kein reiner Mikrocontroller, sondern ein Mikrocontroller Board und beinhaltet dadurch viele Features, die später nicht mehr schaltungstechnisch realisiert werden müssen.



Abbildung 48 Arduino Mega2560 [3]

Der Controller unterstützt wahlweise 54 digitale Eingangs-/Ausgangspins sowie 16 analoge Eingangspins, die für Spannungen zwischen 0 bis 10 Volt ausgelegt sind. Des Weiteren besteht die Möglichkeit einer PWM. Der Controller wird mittels der Software Arduino in C programmiert und bietet viel Bibliotheken, die viel Programmieraufwand ersparen.

Trotz der vielen integrierten Features auf der Mikrocontroller-Platine wird zum Überwachen und Steuern des Brennstoffzellen-Stacks eine zusätzliche Elektronik benötigt. Diese kompiliert den Mikrocontroller mit den einzelnen Hardware-Bauteilen. Die einzelnen dazu notwendigen Steueralgorithmen werden auf einer Platine realisiert. Die Mikrocontroller-Platine wird wie ein Rucksack auf die entwickelte Platine aufgesetzt. Der Aufbau der einzelnen Steuerungen wird im Folgenden erläutert gefolgt von der Anordnung auf der kompletten Platine.

### 5.3.2.1 Aufbau der Steuerplatine

Zum ansteuern des Lüfters in Abhängigkeit der Leistung muss die Stackspannung und der –strom erfasst werden. Dazu wird der gleiche Sensor wie beim Akkumanagement benutzt, der ACS758 von Allegro. Die Berechnung des Stromes ist in der Formel 16 Seite 25 erläutert. Der Mikrocontroller kann Spannungen bis zu 10 Volt messen, die Brennstoffzelle hat allerdings einen Spannungsbereich von 16 bis 40 Volt. Um diese Spannung zu erfassen, wird diese wieder mit Hilfe eines Spannungsteilers skaliert. Für eine feinere Skalierungsanpassung wird ein variabler Widerstand im Spannungsteiler verwendet. Der Aufbau ist in der Abbildung 49 dargestellt. AI ist hierbei der analoge Eingangspin des Mikrocontrollers und GND dessen Masse.

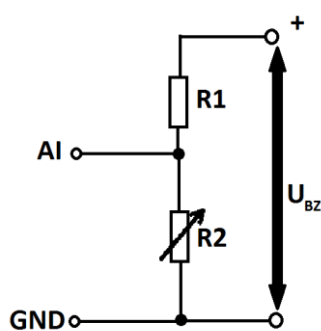


Abbildung 49 Spannungsmessung der Brennstoffzelle [3]

Die Aufbereitung der Analogwerte erfolgt nah an den Eingängen des Mikrocontrollers und ist in Abbildung 50 auf der Platine lokalisiert.

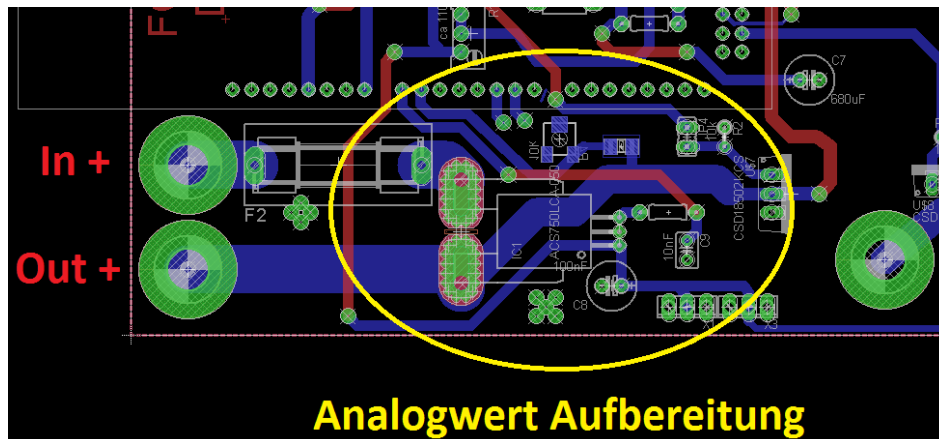


Abbildung 50 Analogwert Aufbereitung auf der Platine [3]

Zum Steuern und Überwachen der Anlage werden digitale Eingangspins benötigt. Diese können zwei Zustände annehmen, das heißt, sie sind entweder mit Spannung beaufschlagt (1) oder sind Spannungslos (0). Um fehlschalten durch Induktionen oder elektromagnetischer Strahlung zu verhindern, werden die digitalen Pins auf Masse (pull down) oder auf die Betriebsspannung von 5 Volt (pull up) mit einem hochohmigen Widerstand gezogen. Auf der Platine werden pull-down-Widerstände benutzt, das Schaltschema dazu ist in der Abbildung 51 dargestellt.

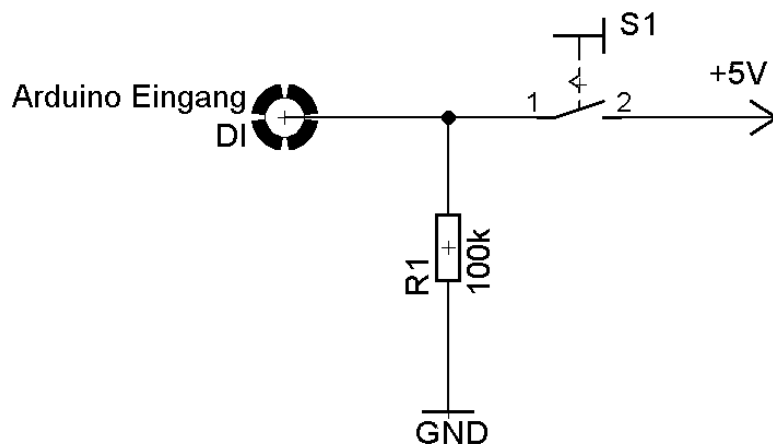


Abbildung 51 Schaltschema pull-down-Widerstand [3]

Es wird ein digitaler Eingang zum Starten des Systems, zur Freigabe des Systems sowie für die Sicherheitskette benötigt. Die pull-down-Widerstände sind nah an den digitalen Eingängen des Mikrocontrollers platziert und die Schalter werden an den Anschlussklemmen X4 angeschlossen (siehe Abbildung 52).



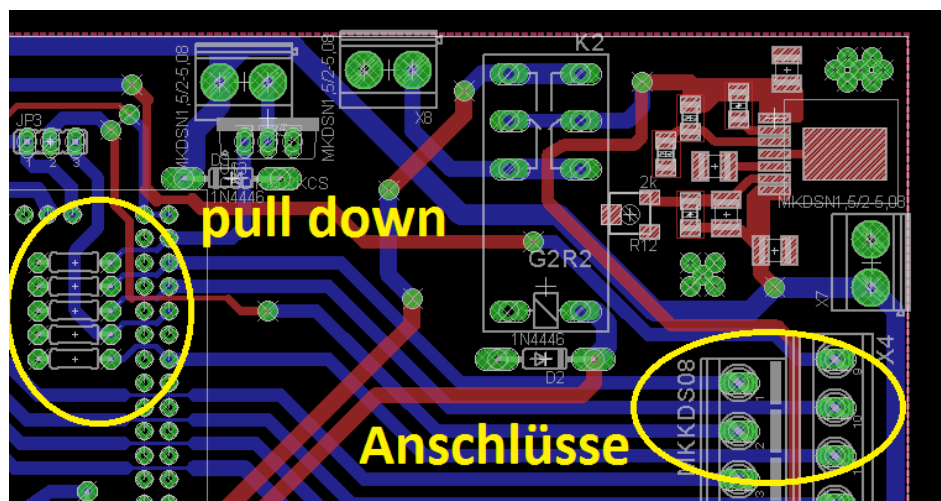


Abbildung 52 digitale Eingänge auf der Platine [3]

Über eine PWM vom Mikrocontroller lässt sich die Drehzahl des Lüfters regulieren. Die dazu nötige Schaltung ist in der Abbildung 46 auf Seite 32 dargestellt. Dabei wird als Transistor ein N-Kanal MOS-FET verwendet. Dieser zieht, sobald das Gate angesteuert wird, den Widerstand R7 mit 33 k $\Omega$  auf Masse und aktiviert somit den Spannungsteiler. Je länger die Einschaltzeit, desto größer wird die effektive Spannung am Lüfteranschluss 3 und die Drehzahl steigt. Der Steueralgorithmus wird dicht am PWM-Ausgang des Mikrocontrollers positioniert (siehe Abbildung 53). So wird die Gate-Leitung kurz gehalten und es kommt zu geringeren Störemissionen. Der Anschluss des Lüfters erfolgt mit Klemmböcken.

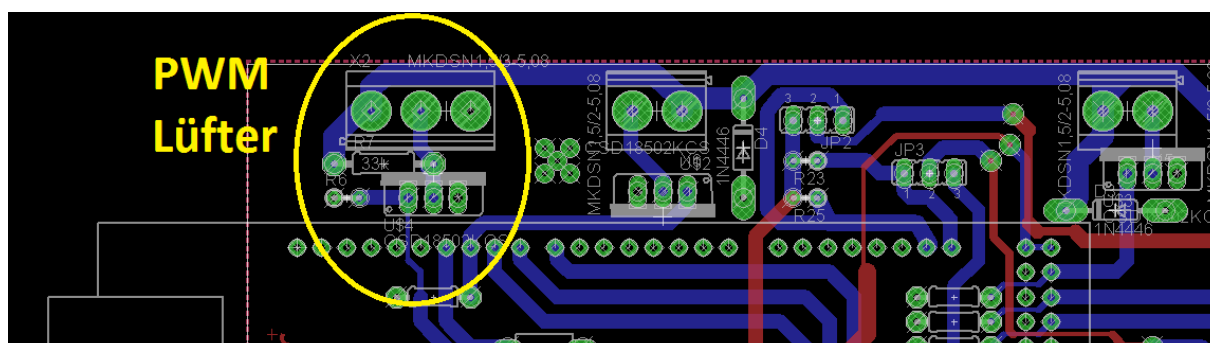


Abbildung 53 Position der Lüfteransteuerung auf der Platine [3]

Der Mikrocontroller kann die Magnetventile zum Freischalten des Wasserstoffs und zum Spülen des Stacks nicht direkt ansteuern, da sowohl die Ausgangsspannung als auch der Ausgangsstrom nicht groß genug sind. Als Hilfsmittel wird ein MOS-FET benutzt. Dieser Transistor kann mit der 5 Volt Ausgangsspannung des Controllers direkt angesteuert werden und dient als elektrischer Schalter, der den Strompfad der Spulen schließt. Ein MOS-FET ist ein Feld-Effekt-Transistor. Bedeutet das Gate kann als Kondensator betrachtet werden. Sobald der Kondensator geladen ist, leitet der Transistor. Um den Kondensator wieder zu entladen, wird ein pull-down-Widerstand benötigt (R1 in der Abbildung 54).

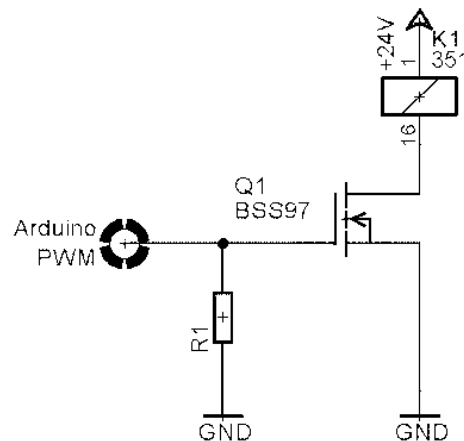


Abbildung 54 Schaltschema Spulenansteuerung [3]

Die Steuerelektronik wird nah an der Mikrocontroller Platine positioniert (siehe Abbildung 55). Das vermeidet lange Gate Leitungen, die störungsanfällig wären. Der Anschluss der Ventile erfolgt an Klemmböcken. Dies ermöglicht eine schnellere Montage und Demontage. Antiparallel zu den Anschlüssen wird zur Vermeidung von hohen Induktiven Spannungen eine Freilaufdiode geschaltet.

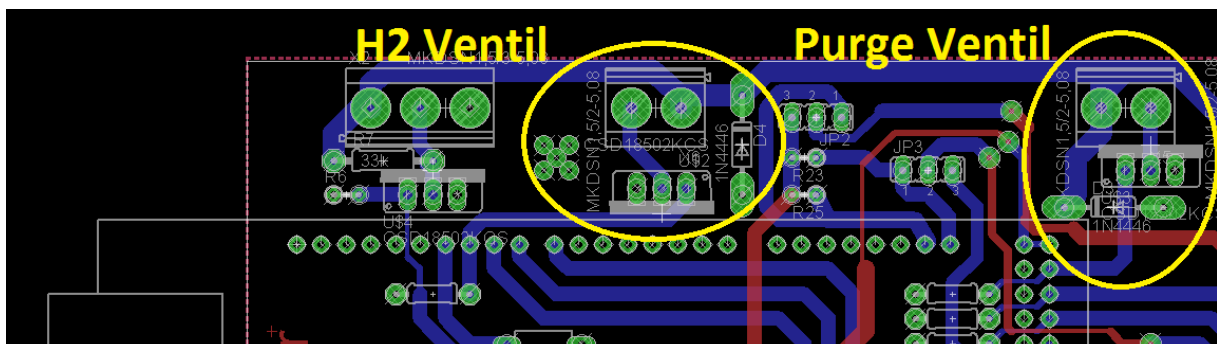


Abbildung 55 Position der Ventilansteuerung auf der Platine [3]

Sowohl die Ventile als auch der Lüfter benötigen eine Versorgungsspannung von 24 Volt. Die Brennstoffzelle hat allerdings einen Spannungsbereich von 20 bis 40 Volt. Für eine kontinuierliche Versorgung wird dafür ein Tiefsetzsteller entwickelt und am äußeren Rand der Platine positioniert (siehe Abbildung 56). Dieser wandelt mit Hilfe von Induktionen die Eingangsspannung effizient in eine kleinere Spannung um.

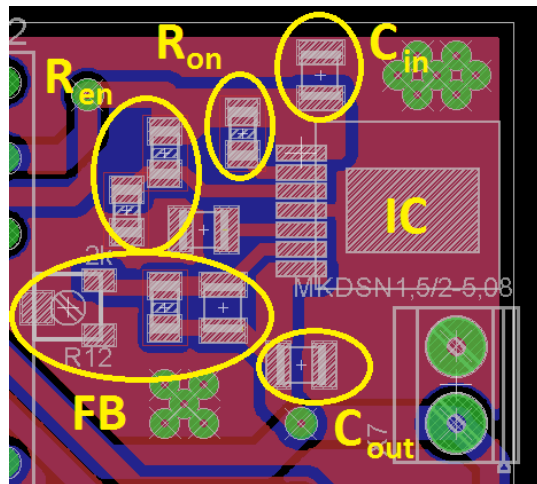


Abbildung 56 Position des 24 Volt-Schaltreglers auf der Platine [3]

Mit einem MagI<sup>3</sup>C Power Module von Würth Elektronik lassen sich hohe Effizienzwerte erzielen (97%). Der IC zeichnet sich durch einen geringen Eigenverbrauch und eine kompakte Bauform aus. Des Weiteren lassen sich die Ausgangsspannung und die Schaltfrequenz individuell parametrieren. Die Schaltfrequenz beeinflusst die Effizienz und die Spannungskonstanz bei unterschiedlichen Strömen. Je höher die Frequenz, desto ineffizienter, aber konstanter arbeitet der Tiefsetzsteller. Der IC ist für Ausgangsströme bis zu 3 A ausgelegt. Die Entwicklung und Dimensionierung der Schaltung und daraus des Platinen-Layouts erfolgt mit Hilfe der Tabelle 7 aus dem Datenblatt des Chips.

Tabelle 7 Tabelle aus dem Datenblatt des MagI<sup>3</sup>C's

V <sub>out</sub>	24V	18V	15V	12V	5V
R <sub>FBT</sub>	34kΩ	34kΩ	34kΩ	34kΩ	34kΩ
R <sub>FBB</sub>	1.18kΩ	1.58kΩ	1.91kΩ	2.43kΩ	6.49kΩ
R <sub>ON</sub>	499kΩ	374kΩ	287kΩ	249kΩ	100kΩ
C <sub>IN</sub>	10μF				
C <sub>OUT</sub>	33μF	33μF	47μF	47μF	100μF
C <sub>SS</sub>	4700pF				
C <sub>FF</sub>	0.022μF				
C <sub>OUT-ESR</sub>	1-40mΩ	1-40mΩ	1-42mΩ	1-45mΩ	1-95mΩ
V <sub>IN</sub>	28-42V	22-42V	18-42V	15-42V	8-42V

Es wird ein Ausgangsspannungsbereich zwischen 18 und 24 Volt angestrebt. Das Schaltschema ist dem Anhang VIII zu entnehmen. Es wird ein R<sub>ON</sub> von 470 kΩ gewählt. Die resultierende Schaltfrequenz lässt sich nach der Formel 6 aus dem Datenblatt berechnen:

Formel 18

$$f_{sw} \approx \frac{V_{OUT} \cdot (V_{IN} - 1) \cdot 10 \mu H \cdot 1,18 \cdot 10^{20} \cdot I_{OUT}}{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot R_{ON}^2}$$

Nach dem Einsetzen ergibt sich die Schaltfrequenz von:

Formel 19

$$f_{sw} \approx \frac{21 \text{ Volt} \cdot (30 \text{ Volt} - 1) \cdot 10 \mu H \cdot 1,18 \cdot 10^{20} \cdot 3 \text{ A}}{(30 \text{ Volt} - 21 \text{ Volt}) \cdot (470 \text{ k}\Omega)^2} = 208 \text{ kHz}$$

Die Frequenz liegt im unteren möglichen Bereich des IC's. Der Spannungsunterschied ist gering, dadurch arbeitet er sehr effizient und kann Leistungsschwankungen schnell kompensieren. Der Tiefsetzsteller steuert die Einschaltzeit am internen MOS-FET so, dass die Spannung am Feedback-Pin (FB) mit der internen Referenzspannung übereinstimmt. Mit einem einstellbaren Spannungsteiler ( $R_{FBT} + R_{FBB}$ ) kann so die Ausgangsspannung stufenlos verändert werden. Dabei ist der Widerstand  $R_{FBB}$  ein Potentiometer. Bei dem MagI<sup>3</sup>C beträgt die Referenzspannung 0,803 V. Die empfohlenen Parameter werden für die restlichen Komponenten aus der Tabelle übernommen. Der Enable-Eingang wird mit einem Spannungsteiler angesteuert. Sobald eine Spannungsschwelle von 1,18 Volt erreicht wird, fängt er an zu arbeiten. Der Spannungsteiler dient als Unterspannungsabschaltung. Wenn die Eingangsspannung unter 18 Volt ist, so ist die Spannung am Enable-Eingang auch unterhalb der Schaltschwelle. Die dazu nötigen Widerstände lassen sich nach der Formel 16 aus dem Datenblatt berechnen:

**Formel 20**

$$\frac{R_{ENT}}{R_{ENB}} = \frac{U_{UV}}{1,18 \text{ Volt}} - 1 = \frac{18 \text{ Volt}}{1,18 \text{ Volt}} - 1 = 14,25$$

Das Verhältnis von 14,25 zwischen den obersten Widerstand  $R_{ENT}$  und den unteren  $R_{ENB}$  Widerstand am enable-Eingang lässt sich somit nach dem Einsetzen der Unterspannung von 18 Volt in  $U_{UV}$  geteilt durch die Referenzspannung von 1,18 Volt minus 1 errechnen. (Formel 20). Um hohe Verluste zu vermeiden, wird ein hochohmiger Spannungsteiler benutzt. Dabei wird ein  $R_{ENT}$  von 470 kΩ verwendet. Nach Umstellen der Formel 20 nach  $R_{ENB}$  und Einsetzen ergibt sich ein  $R_{ENB}$  von:

**Formel 21**

$$R_{ENB} = \frac{R_{ENT}}{14,25} = \frac{470 \text{ k}\Omega}{14,25} = 32,98 \text{ k}\Omega$$

Es werden Widerstände von 33 kΩ produziert. Somit ergibt sich eine kleine Abweichung der gewünschten Unterspannung. Diese lässt sich berechnen, indem Formel 20 nach  $U_{UV}$  umgestellt wird und die Werte eingesetzt werden:

**Formel 22**

$$U_{UV} = \left( \frac{R_{ENT}}{R_{ENB}} + 1 \right) \cdot 1,18 \text{ Volt} = \left( \frac{470 \text{ k}\Omega}{33 \text{ k}\Omega} + 1 \right) \cdot 1,18 \text{ Volt} = 17,986 \text{ Volt}$$

Die Abweichung ist sehr gering und der Spannungsteiler muss daher nicht neu dimensioniert werden.

Zum starten des Systems wird eine externe Spannungsversorgung benötigt. Nachdem das System gestartet wurde und die Brennstoffzelle ein geeignetes Spannungspotential erreicht hat, soll die Steuerung von der externen Spannungsversorgung auf eine eigene Versorgung umschalten. Dies geschieht mit Hilfe eines Relais, das direkt von dem Mikrocontroller angesteuert wird. Um die Spule mit der nötigen Leistung zu versorgen, wird sie von drei Ausgängen am Controller angesteuert. Die Positionierung erfolgt nah am Schaltregler und ist in der Abbildung 57 dargestellt.

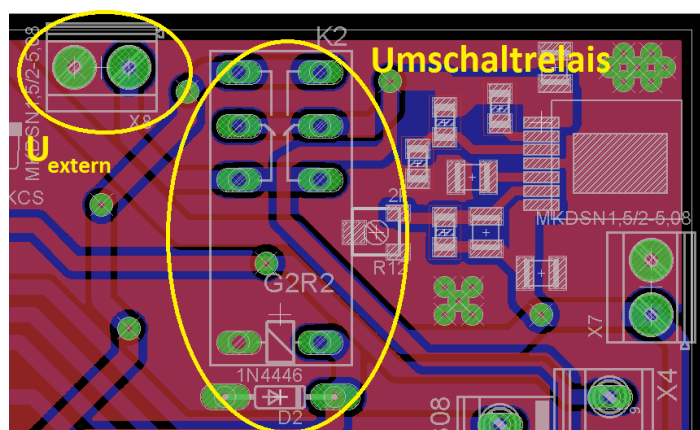


Abbildung 57 Positionierung des Umschaltrelais auf der Platine [3]

Nachdem das System erfolgreich gestartet wurde, auf die eigene Versorgung umgeschaltet wurde und das System die Freigabe von der Beckhoff-Steuerung erhalten hat, soll eine Spannungsfreigabe erfolgen. Dazu wird ein MOS-FET direkt vom Mikrocontroller angesteuert und schaltet die Masse zur Brennstoffzelle frei.

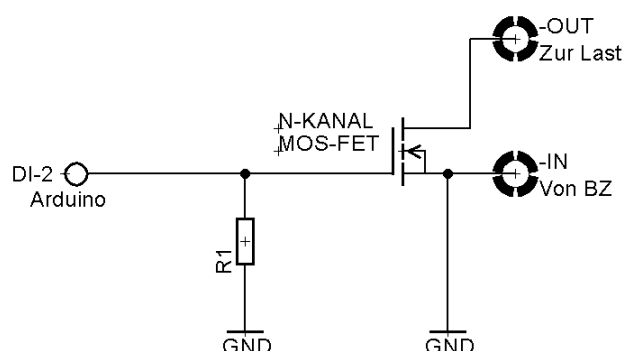
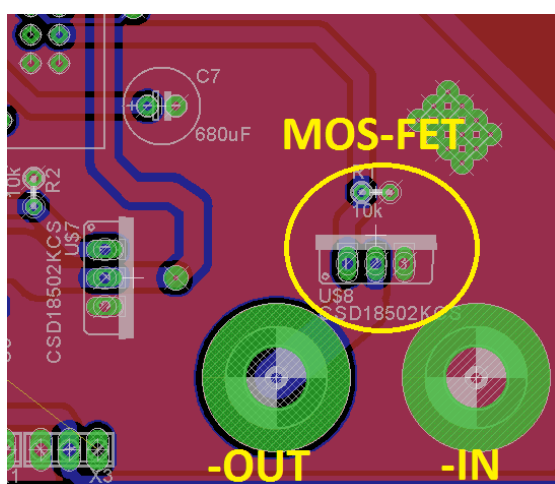


Abbildung 58 Position und Schaltschema der Freischaltung [3]

Der MOS-FET CSD18534KCS von Texas Instruments ist für eine Spannung bis zu 60 Volt und einen kontinuierlichen Strom von bis zu 73 Ampere geeignet. Die Brennstoffzelle besitzt eine Leerlaufspannung von 40 Volt und ist mit einer Sicherung von 15 Ampere abgesichert. Somit werden die Grenzparameter des MOS-FET's eingehalten.

Der Arduino Mega2560 hat einen integrierten Linearregler, der eine Spannung von 7 bis 20 Volt auf einer für die Versorgung notwendige Spannung von 5 Volt erzeugt. Dieser Spannungsbereich ist allerdings auf der Platine nicht verfügbar. Daher wird ein Schaltregler entwickelt, der die benötigte Spannung für die Steuerlogik erzeugt. Dazu wird ein LT 3990-5 verwendet. Dieser Tiefsetzsteller besitzt eine interne Feedbackleitung, die die Ausgangsspannung von 5 V festlegt und ist für Eingangsspannungen bis zu 62 Volt ausgelegt. Er kann Der Schaltregler wird für eine elektromagnetische Verträglichkeit am äußeren Rand der Platine positioniert (siehe Abbildung 59).

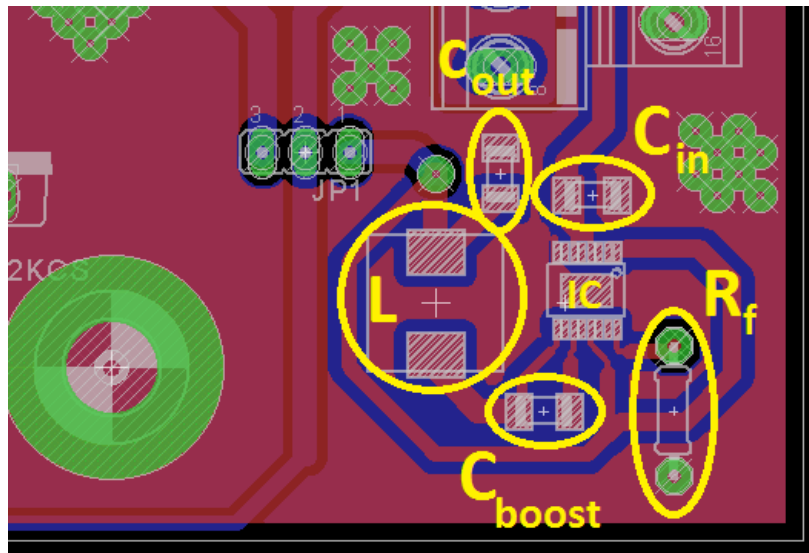


Abbildung 59 Position des 5 Volt-Schaltregler auf der Platine [3]

Die Dimensionierung der Komponenten und das Erstellen des Layouts erfolgt aus den empfohlenen Parametern des Datenblattes. Die Schaltfrequenz kann individuell von 200 kHz bis 2,2 MHz parametrisiert werden und wurde mit einem  $R_f = 374 \text{ k}\Omega$  auf 400 kHz festgelegt. Die Versorgung erfolgt nach den 24 Volt-Schaltregler. Dieser hält die Spannung auf einen konstanten Wert. Es werden daher größere Spannungsschwankungen ausgeschlossen. Als Puffer wird ein Eingangskondensator von  $2,2 \mu\text{F}$  verwendet. Ein Boost-Kondensator  $C_{\text{boost}}$  fängt kurzzeitige größere Leistungsabnahmen ab und wurde mit  $220 \text{ nF}$  parametrisiert. Damit der Schaltregler die Spannung induktiv senkt, benötigt er eine externe Spule  $L$ . Diese wird nach dem Datenblatt mit  $33 \mu\text{H}$  gewählt und zum Glätten wird ein Kondensator  $C_{\text{OUT}}$  von  $22 \mu\text{F}$  parallel geschaltet. Das Schaltschema ist dem Anhang VII zu entnehmen.

Zur Leistungssteigerung der Brennstoffzelle bietet sich eine Kurzschluss-Automatik an. Bei dieser Steuerung wird der Stack impulsweise kurzgeschlossen. Dies veranlasst einen kurzzeitigen erhöhten Protonen- und Elektronenaustausch sowie führt zu einer erhöhten Reaktion. Die Membran wird dadurch feucht gehalten und die Reaktionsflächen sind frei für neue Atome. Die Steuerung erfolgt auf der Platine mit Hilfe eines NE555. Dieser IC ist ein Präzision-Zeitbaustein mit vielen Funktionen, der schon sehr lange auf dem Markt ist und von vielen Herstellern angeboten wird. Um die Kurzschluss-Automatik zu realisieren wird auf eine A-stabile Funktion zurückgegriffen. Dabei wird ein Kondensator geladen und entladen. Beim Aufladevorgang ist der Ausgang High und beim Entladevorgang wird der Ausgang auf Masse gezogen. Die Funktion ist in der Abbildung 60 dargestellt.



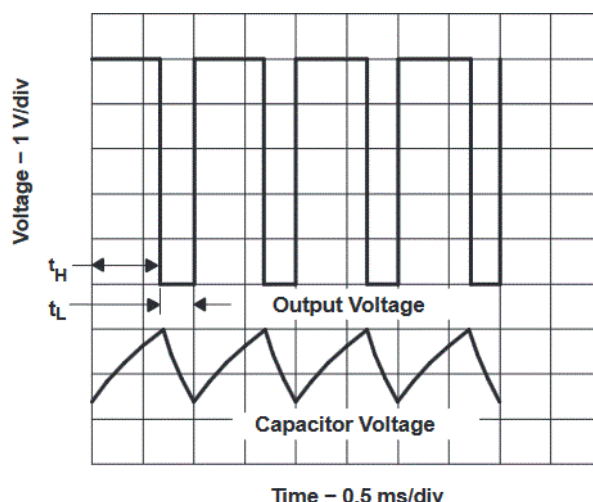


Abbildung 60 Funktions-Diagramm des NE555 A-Stabil [11]

Die Abbildung 61 zeigt das Schaltschema der Ansteuerung für die Kurzschluss-Automatik. Ein 10 nF-Kondensator dient hierbei als Pufferung der Spannungsversorgung. Mit Hilfe des Widerstandes  $R_L$  wird der Ausgang auf ein Niveau der Versorgungsspannung gezogen. Der Kondensator  $C$  wird von der Versorgungsspannung geladen. Dabei beeinflussen die Widerstände  $R_A$  und  $R_B$  die Aufladezeit. Wird die Spannungsschwelle von  $2/3 \cdot V_{CC}$  erreicht, so schaltet der Pin DISCH und entlädt den Kondensator. Die Entladezeit wird hierbei durch den Widerstand  $R_B$  beeinflusst.

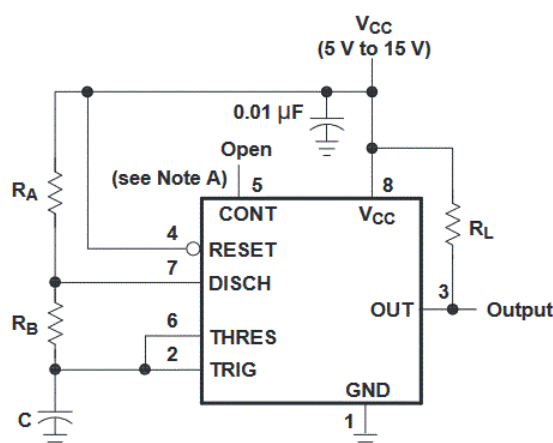


Abbildung 61 NE555-Schaltschema A-Stabil [11]

Die Brennstoffzelle soll für circa 200 Millisekunden kurzgeschlossen werden. Das Intervall soll einstellbar sein und bis zu 45 Sekunden betragen. Zur Dimensionierung der Komponenten wird Formel 2 aus dem Datenblatt (siehe Anhang VII) verwendet:

**Formel 23**

$$t_{low} = 0,693 \cdot R_B \cdot C$$

Als Kondensator wird ein Elektrolyt-Kondensator mit einer Kapazität von 680  $\mu\text{F}$  verwendet. Nach Umstellen der Formel nach  $R_B$ :

**Formel 24**

$$R_B = \frac{t_{low}}{0,693 \cdot C} = \frac{200 \text{ ms} \cdot 10^{-3}}{0,693 \cdot 680 \mu\text{F} \cdot 10^{-6}} = 424,4 \Omega$$

Für  $R_B$  werden fertigungsbedingt ein Widerstand mit  $100 \Omega$  und ein Widerstand mit  $330 \Omega$  in Reihe geschaltet. Dadurch verändert sich die Ausschaltzeit von 200 Millisekunden auf 204 Millisekunden. Zur Dimensionierung des Potentiometers  $R_A$  wird die Formel 1 aus dem Datenblatt verwendet:

**Formel 25**

$$t_{low} = 0,693 \cdot (R_A + R_B) \cdot C$$

Nach umstellen nach  $R_A$  und einsetzen der Werte ergibt sich ein  $R_B$  von:

**Formel 26**

$$R_A = \frac{t_{low}}{0,693 \cdot C} - R_B = \frac{45 \text{ s}}{0,693 \cdot 680 \mu\text{F} \cdot 10^{-6}} - 430 \Omega = 95.062 \Omega$$

Aus der Berechnung heraus ergibt sich ein Potentiometer von  $100 \text{ k}\Omega$ . Dieser ermöglicht ein einstellen der Einschaltzeit  $> 45$  Sekunden. Der Schaltplan ist dem Anhang VII zu entnehmen.

Das Kurzschließen kann mit einem MOS-FET, der in Ausgangsstellung leitend und angesteuert nicht leitend ist, erfolgen. Dies würde der Logik der Steuerung entsprechen. Allerdings ist die Gefahr sehr hoch, dass im Fehlerfall der Stack permanent kurzgeschlossen ist. Um dies zu verhindern wird das Ausgangssignal negiert und ein MOS-FET der im Ausgangszustand nicht leitend ist verwendet. Dazu wird ein NAND-Gatter benutzt. Diese logische Verknüpfung ist ein negiertes Und. Die Und Funktion wird nicht benötigt, daher werden beide Eingangspins gebrückt. Ein low-Signal wird nun in ein high-Signal gewandelt und andersherum. Als MOS-FET wird wieder ein CSD18534KCS von Texas Instruments verwendet. Dieser ist für Impulsströme bis zu 164 Ampere ausgelegt. Die Steuerung wird direkt unter der Mikrocontroller-Platine platziert (siehe Abbildung 62).

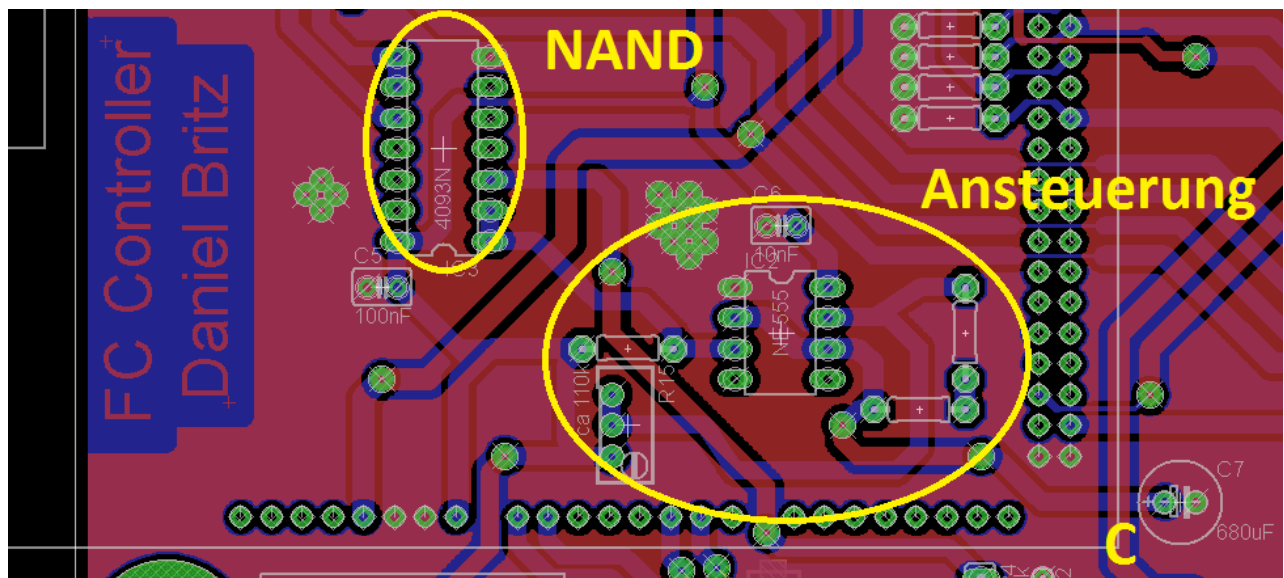


Abbildung 62 Position der Kurzschluss-Automatik [3]

### 5.3.3 Programmaufbau des Controllers

Der Arduino Mega2560 wird mit der Programmiersprache C programmiert. Sobald der Controller mit Spannung versorgt wird, beginnt er seine Initialisierung. Die Pins werden als Eingänge oder Ausgänge definiert, es werden die verwendeten Bibliotheken geladen sowie aufgerufen und eine Deklaration von Variablen erfolgt. Danach arbeitet der Controller zyklusweise das Hauptprogramm ab. Am Beginn jedes Zyklus wird ein Sicherheitscheck durchgeführt, bei dem die Not-Aus-Kette, die Wasserstoffsensoren sowie die Drucksensoren abgefragt werden. Im Fehlerfall wird das System kontrolliert heruntergefahren. Der Ablauf ist hierbei vom Fehler abhängig. Nach dem erfolgreichen Sicherheitscheck werden im Hauptprogramm Unterprogramme aufgerufen und abgearbeitet. Der Ablauf ist in der Abbildung 63 mit Hilfe eines Block Diagramms dargestellt. Der Quellcode ist dem Anhang VII angefügt.

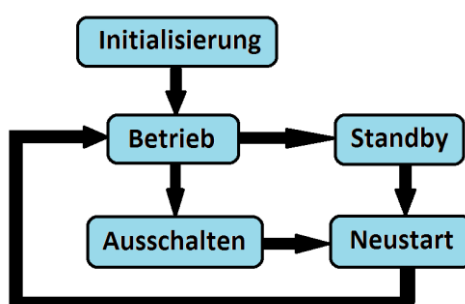


Abbildung 63 Programmablauf im Hauptprogramm [3]

#### 5.3.3.1 Initialisierung

Als erstes Unterprogramm wird die „Initialisierung“ abgearbeitet. Mit dem Bestätigen, durch Drücken des Startknopfes auf der Brennstoffzelle wird das Programm ausgeführt. Als erstes werden alle Ausgänge auf 0 gesetzt. Danach folgt das Öffnen des Wasserstoffventils. Nach einer Wartezeit von 500 Millisekunden wird das Ventil mit einer PWM von 50 % angesteuert. Zum Halten des Ventils wird eine geringere Leistung benötigt, die PWM halbiert die Effektivspannung und somit wird nur noch 25 % der Leistung benötigt:

**Formel 27**

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = \frac{(U \div 2)^2}{R} = \frac{U^2}{4 \cdot R} \rightarrow 25\% P$$

Nun wird der Lüfter mit 50 % seiner maximalen Drehzahl gestartet. Nach einer Anlaufzeit von drei Sekunden wird die Schleife Spülen durchlaufen. In der wird der Stack durch öffnen des Purge-Ventils mit Wasserstoff durchspült und Fremdgase sowie Verunreinigungen hinausgeblasen. Diese Prozedur wird mehrmals durchgeführt, indem das Ventil alle 2 Sekunden für 600 Millisekunden geöffnet wird. Nun wird die Spannung kontinuierlich gemessen und sobald sie ein Potential von 30 Volt überschreitet, schaltet das System von einer externen Versorgung auf Eigenversorgung um und die Lüfter-Drehzahl wird auf 25 % reduziert. Der Ablauf der Initialisierung ist in der Abbildung 64 mit Hilfe eines Block-Diagramms dargestellt. Programmierschleifen wurden in dem Schema mit grüner Farbe hinterlegt.

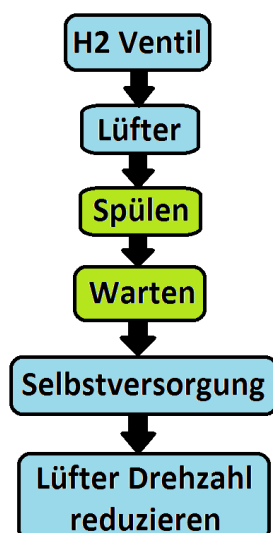


Abbildung 64 Block-Diagramm der Initialisierung [3]

### 5.3.3.2 Betrieb

Nachdem die Initialisierung durchgeführt wurde, ist das System betriebsbereit. Die Freigabe dazu erfolgt von der Beckhoff-Steuerung. Sobald ein potentialfreier Kontakt geschlossen wird, startet das Unterprogramm „Betrieb“. Die Spannung von der Brennstoffzelle wird zur Last freigegeben. Dazu wird der Ausgangs-MOS-FET angesteuert. Nun erfolgt eine Berechnung des Ausgangsstroms sowie der Stack-Spannung. Zur Spannungsmessung besitzt der Arduino einen integrierten 10-bit analog/digital Wandler. Der Wandler quantifiziert folglich die maximalen 5 Volt Eingangsspannung in  $2^{10}$  Stufen. Daraus ergibt sich eine Auflösung der Spannung von:

**Formel 28**

$$A = \frac{\text{maximale Spannung}}{\text{quantifizierung}} = \frac{5 \text{ Volt}}{2^{10}} = 4,88 \text{ mV/Einheit}$$

Somit lässt sich die Spannung mit Hilfe der Skalierung des Spannungsteilers wie folgt berechnen:

**Formel 29**

$$U = \text{Digitalwert} \cdot A \cdot \text{Skalierung} = \text{Digitalwert} \cdot 4,88 \text{ mV/Einheit} \cdot 10$$

Der Strom lässt sich durch Integrieren der Auflösung in die Formel 16 (siehe Seite 25) berechnen:

**Formel 30**

$$I = \frac{\text{Digitalwert} \cdot A - \text{Offset}}{\text{Auflösung}} = \frac{\text{Digitalwert} \cdot 4,88 \text{ mV/Einheit} - 600 \text{ mV}}{60 \text{ mV/A}}$$

Mit Hilfe der berechneten Werte aus der Formel 29 und Formel 30 lässt sich die elektrische Leistung durch  $P = U \cdot I$  bestimmen. Der Lüfter soll die Drehzahl in Abhängigkeit der Leistung variieren. Wenn keine Leistung benötigt wird, dann muss er mit 10 % seiner maximalen Drehzahl und bei der maximalen Leistung von 1000 Watt soll er folglich mit der maximalen Drehzahl arbeiten. Die 10 % entsprechen hierbei der minimalst möglichen Drehzahl. Bei einem digitalen Wert von 255 wird der

Lüfter mit 100 % PWM-Signal angesteuert. Daraus ergibt sich ein minimaler Wert von aufgerundet 26. Die Kennlinie ist in der Abbildung 65 dargestellt.

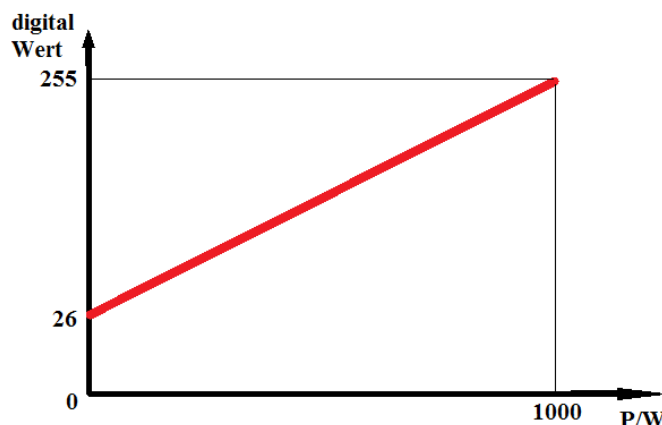


Abbildung 65 Kennlinie Lüfter-Drehzahl [3]

Aus der Kennlinie lässt sich die Funktion herleiten:

**Formel 31**

$$y = \frac{\Delta y}{\Delta x} x + n = \frac{255 - 26}{1000} \cdot x + 26 = \frac{229}{1000} x + 26$$

Somit ergibt sich eine Lüfter-Drehzahl von:

**Formel 32**

$$freq = P \cdot \frac{229}{1000} + 26$$

Die aktuelle berechnete PWM (freq) wird mit der aus dem vorherigen Zyklus (freq\_old) verglichen. Ist die aktuelle PWM kleiner als die vorhergehende, wird nach einer Wartezeit von einer Sekunde die Drehzahl auf den aktuellen Wert gesenkt. Wenn die aktuelle PWM allerdings größer ist, dann entfällt die Wartezeit und die Drehzahl wird sofort nach oben korrigiert.

### 5.3.3.3 Standby

Erfolgt nach der Initialisierung oder während des Betriebs eine Abschaltung der Freigabe von der Beckhoff-Steuerung, dann wird das Unterprogramm „Standby“ gestartet. Dieses schaltet den Spannungsausgang, das Wasserstoffventil und den Lüfter ab. Die Brennstoffzellen-Spannung wird permanent kontrolliert. Fällt sie unter ein Potential von 23 Volt, so wird das Unterprogramm „Neustart“ aufgerufen, dass das System kontrolliert hochfährt, bis wieder ein geeignetes Potential erreicht ist. Danach erfolgt ein erneutes Abschalten des Wasserstoffventils und des Lüfters. Sobald eine Freigabe der Beckhoff-Steuerung erfolgt, startet das System ähnlich wie bei der Initialisierung. Das Spülen des Stacks mit Wasserstoff wird hierbei vernachlässigt.

#### **5.3.3.4 Ausschalten**

Im Fehlerfall wird das Unterprogramm Ausschalten aufgerufen. Dies kann durch Unterbrechen der Not-Aus-Kette, durch das Auslösen eines der Wasserstoffsensoren oder durch zu hohen Systemdruck erfolgen. Sobald eines dieser Kriterien erfüllt ist, wird der Spannungsausgang, die Selbstversorgung, das Wasserstoffventil und der Lüfter ausgeschaltet. Das System wird Drucklos geschaltet. Dazu erfolgt ein Öffnen des Purge-Ventils für eine Sekunde. Wurde der Fehler beseitigt, dann kann das System mit dem Taster auf der Brennstoffzelle neugestartet werden. Dazu wird das Unterprogramm „Neustart“ aufgerufen.

#### **5.3.3.5 Neustart**

Nachdem das System den Standby-Modus verlässt oder ein Fehler behoben und quittiert wurde, wird das Unterprogramm „Neustart“ aufgerufen. Die Abarbeitung des Programms ist abhängig vom vorherigen Modus. Nach einem Fehler wird zusätzlich zum eigentlichen Neustart das System mit Wasserstoff gespült. Dies verhindert Einlagerungen von Fremdgasen und -partikeln. Im Standby-Modus besteht keine Gefahr von Fremdeinlagerungen, daher kann auf das Spülen verzichtet werden. Zu Beginn des Neustartes wird das Wasserstoff-Ventil geöffnet und der Lüfter gestartet. Nach einer kurzen Wartezeit von 1,2 Sekunden, wird kontinuierlich die Spannung gemessen. Sobald diese ein Potential von 30 Volt überschreitet, wird die Lüfter-Drehzahl auf 25 % reduziert und der Spannungsausgang wird freigeschaltet. Wurde das Unterprogramm nach einem Fehler aufgerufen, so wird wieder auf einer Selbstversorgung umgeschaltet.

#### **5.3.3.6 Sicherheitscheck**

Zu Beginn eines jeden Arbeitszyklus wird das Unterprogramm Sicherheitscheck aufgerufen. Dieses überwacht die Temperatursensoren, die Wasserstoffsensoren sowie die Sicherheitskette und fährt das System im Fehlerfall koordiniert herunter. Zuerst werden der Spannungsausgang, die Selbstversorgung, der Lüfter und das Wasserstoff-Ventil ausgeschaltet. Nun folgt das Drucklosschalten des Systems. Dazu wird für 2 Sekunden das Purge-Ventil geöffnet und danach wieder geschlossen. Das Unterprogramm kann erst verlassen werden, wenn der Fehler behoben wurde und eine Quittierung mit Hilfe des Startknopfes an der Brennstoffzelle erfolgt.

#### **5.3.3.7 Human-Maschine-Interface (HMI)**

Für das sogenannte „Debugging“ eignet sich der Serial-Monitor. Dieser vereinfacht eine Fehlersuche und kann Systemparameter visualisieren. Daher dient er als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine (HMI). Sobald eine USB-Verbindung zwischen dem Mikrocontroller und einem Rechner besteht und der Serial-Monitor im Programmieroberfläche Arduino aufgerufen wird, startet die Kommunikation. Der Controller sendet seine Daten, ist allerdings nicht bereit, Daten zu empfangen. Diese Funktion wird nicht benötigt. Gemessene Werte, wie die Spannung oder der Strom, sowie



errechnete, wie die Leistung oder die Lüfter-Drehzahl, werden zum Monitor übertragen. Sobald der Mikrocontroller ein Unterprogramm aufruft, einen Ausgang schaltet oder einen Fehler oder eine Warnung lokalisiert, wird eine Meldung gesendet. Die Oberfläche ist in der Abbildung 66 dargestellt.

```
COM3 (Arduino Mega or Mega 2560)

Safety devices ok. Wait for initi :-D System
Safety devices ok. Wait for initi :-D System
Safety devices ok. Wait for initi :-D System
Safety devices ok. Wait for initi :-D System
Start
open main-valve
start fan
purge
purge
purge
fan_start
16.70
fan_start
16.61
```

Abbildung 66 Arduino Serial-Monitor [3]

Die Abbildung zeigt einen Meldungsverlauf im Serial-Monitor der Entwicklungsumgebung Arduino beim ordnungsgemäßen Start des Systems.

### 5.3.4 Einbindung des Brennstoffzellensystems

Die Brennstoffzelle dient als Redundanzlösung zur PV-Anlage. Daher wird sie, ähnlich wie die PV-Module, der an einem Wechselrichter, der in einem AC-Bus eingebunden ist, angeschlossen. Als Wechselrichter wird für eine leichtere Auswertung, der gleiche Typ wie bei der PV-Anlage genutzt. Dieser lässt sich unproblematisch in die Beckhoff-Steuerung einbinden. Allerdings benötigt er eine minimale Eingangsspannung von 40 Volt. Die Brennstoffzelle hat einen Arbeitsbereich von 20 – 40 Volt. Um den Wechselrichter nutzen zu können, muss die Brennstoffzellen-Spannung hochgesetzt werden. Dazu wird ein Hochsetzsteller (siehe Abbildung 67) mit einer Eingangsspannung zwischen 10 und 60 Volt und einer einstellbaren Ausgangsspannung bis zu 80 Volt eingesetzt.

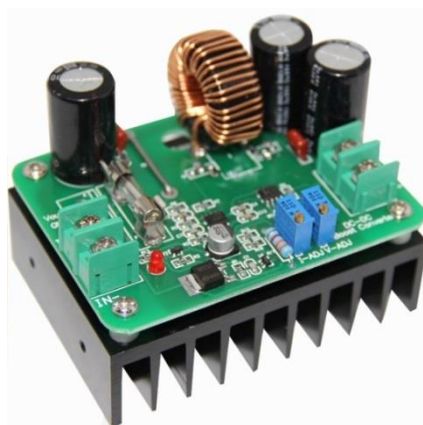


Abbildung 67 Hochsetzsteller der Firma Hengjiaan [18]

Der Hochsetzsteller bietet die Möglichkeit den maximalen Eingangsstrom zu limitieren. Um dies zu ermöglichen, wird der Spannungsabfall an einem Widerstand gemessen, den sogenannten Messshunt. Dieser hat einen niederohmigen Widerstand von meistens einigen Milliohm. Der Spannungsabfall lässt sich mit Hilfe des Ohm'schen Gesetzes  $U = R \cdot I$  bestimmen. Daraus ergibt sich, je größer der Strom, desto größer ist der Spannungsabfall. Der gemessene Wert wird mit einer Referenzspannung verglichen. Ist der gemessene Wert größer, so regelt der Hochsetzsteller die Spannung herab und der Strom wird dadurch verringert.

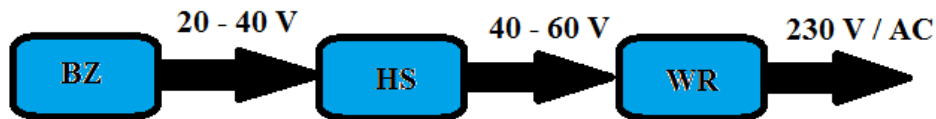


Abbildung 68 Einbindung der BZ ins System [3]

Der Hochsetzsteller ist auf eine Ausgangsspannung von 60 Volt eingestellt. Dieser Wert wurde empirisch ermittelt. Der gemessene Strom am Shunt setzt sich aus dem Wirkstrom und dem Stromripple zusammen. Durch Kurzschließen der auf dem Hochsetzsteller befindlichen Spule mit Hilfe eines MOS-FETs steigt die im Magnetfeld gespeicherte Energie. Wird der Schalter wieder geöffnet, entsteht in der Spule ein Drang, den Strom zu halten. Dies geschieht durch induktive Erhöhung der Spannung. Je größer die Differenz zwischen der Eingangs- und Ausgangsspannung, desto mehr Energie wird benötigt und folglich höher ist der Stromripple. Durch den integrierten MPPT im Wechselrichter wird der Arbeitspunkt mit der maximal möglichen Leistung angestrebt. Um die maximale Leistung zu erzielen, muss der Stromripple möglichst kleingehalten werden. Folglich wird im Arbeitspunkt die Spannung am Hochsetzsteller die minimale Eingangsspannung des Wechselrichters betragen.

## 5.4 Lastprofil Simulation

Das Lastprofil bezeichnet den zeitlichen Verlauf der abgenommen elektrischen Leistung. Dieses ist stark abhängig von der Tageszeit, dem Wochentag sowie der Saison. Das Lastprofil setzt sich aus einer konstanten Grundlast, einer zeitlich abhängigen Mittellast und einer zufälligen Spitzenlast zusammen (siehe Abbildung 69). Die Grundlast spiegelt Geräte die permanent Leistung benötigen, wie z.B. Heizungspumpen, Geräte im „Standby“ oder Gebäudesteuerungen, wieder. Die Mittellast beinhaltet elektrische Verbraucher die zusätzlich zur Grundlast vom Nutzer im Alltag verwendet werden wie z.B. ein Computer zum Arbeiten, Licht oder Klimaanlage. Diese Last besitzt geringe Schwankungen. Die Spitzenlast dagegen ist mit starken Schwankungen behaftet, die ihr Maximum zu Stoßzeiten am Früh, Mittag und Abend aufweist. Zu diesen Zeiten kommen zusätzliche Verbraucher wie z.B. Kaffeemaschine, Herd oder Fön hinzu.

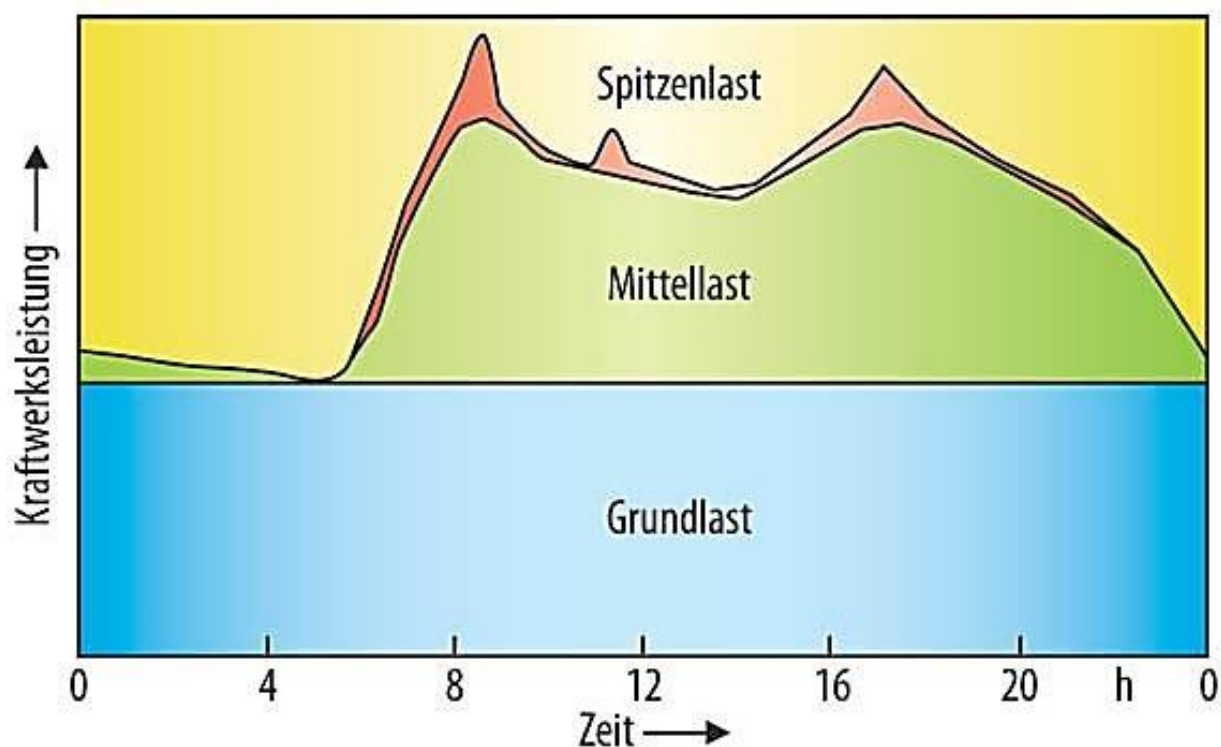


Abbildung 69 elektrisches Lastprofil eines Standard Haushaltes [19]

Eine sichere und ökonomische Versorgung ist nicht nur im Interesse des Verbrauchers, sondern auch des Stromerzeugers. Um die Lastgänge zu prognostizieren werden bei Verbraucher mit einem Jahresverbrauch von mehr als 100.000 kWh die Lastgänge gemessen und bei Verbrauchern mit einem geringeren Jahresverbrauch wird auf ein Standardlastprofil (SLP) zurückgegriffen. Beim SLP erfolgt eine Substituierung eines zeitlich normierten Branchen- oder kundenbezogenen Verbrauchsmusters zum Endverbraucher. Hierbei erfolgt eine Unterteilung der Verbrauchsmuster in den Werktagen, Samstagen und Sonntagen (Tryptage) sowie in Sommermonaten, Wintermonaten und Übergangsmonaten (Saison). Folglich ergeben sich daraus neun Profile mit unterschiedlichen zeitlichen Gewichtungen. Die Abbildung 70 stellt einen Vergleich zwischen den Gewichtungen der unterschiedlichen Tryptage in einem Übergangsmonat dar.

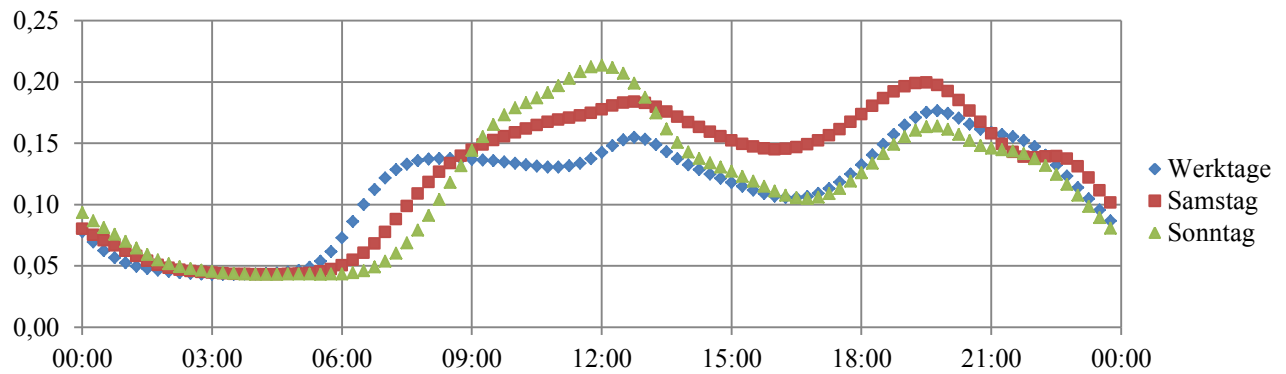


Abbildung 70 Vergleich der Typtage in Übergangsmonaten [3]

Aus diesem Vergleich lässt sich eine zeitliche Verschiebung der Mittellast sowie der Spitzenlast erkennen. Dies ist auf eine Änderung des Alltagsablaufes des Verbrauchers zurückzuführen.

Zum Simulieren der drei verschiedenen Lasten werden drei Verbraucher angeschlossen. Dabei entspricht eine Lampe, die permanent mit Energie versorgt wird, die Grundlast. Mit Hilfe einer weiteren Lampe, die von einer Zeitschaltuhr angesteuert wird, wird die Mittellast simuliert. Die Spitzenlasten sind Lasten die zufällig anfallen. Mittels eines Kühlschranks lassen sich diese Lasten simulieren. Die Dimensionierung der Verbraucher und die resultierende Leistung mit Berücksichtigung der Skalierung ist in der Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 Dimensionierung der Lasten [3]

Last	Leistung	Resultierende Leistung
Grundlast	42 W	1,7 kW
Mittellast	42 W	1,7 kW
Spitzenlast	80 W	3,2 kW

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Suche nach geeigneten Lösungsansätzen zur Optimierung der Versuchsanlage zur elektrischen Autarkie am ifn Anwenderzentrum in Lauchhammer wurde die PV-Anlage mit weiteren Solarpanels erweitert. Die Panels wurden mit einem Anstellwinkel von  $70^\circ$  eingerichtet und mit einem herkömmlichen Anstellwinkel von  $30^\circ$  verglichen. Die erhöhten Ertragserwartungen durch größeres Ausnutzen der diffusen Strahlung haben sich im Verlauf der Arbeit nicht bestätigt. Der Anstellwinkel ist zu groß. Des Weiteren wurden zwei Technologien zum Kompensieren der Verschattungsverluste miteinander verglichen. Dabei wurden Schottky-Bypass-Dioden mit Smart-Bypass-Dioden verglichen. Die Verminderung der Verluste ist ziemlich gering und macht folglich nur bei größeren Anlagen Sinn.

Die in der Anlage integrierte Schalttafel, die das Energiemanagement übernahm, wurde durch eine eigene Lösung ersetzt. Diese Alternative stellte sich als wesentlich flexibler und effektiver heraus, da sie direkt mit der Beckhoff Steuerung kompatibel ist.

Um fehlende Erträge zu kompensieren wurde eine Redundanzlösung mit Hilfe einer Brennstoffzelle erprobt. Diese Lösung erfüllte die Anforderungen. Dennoch lässt sie das System durch verändern der Systemintegration optimieren. Dieses System ist in der Abbildung 71 dargestellt.

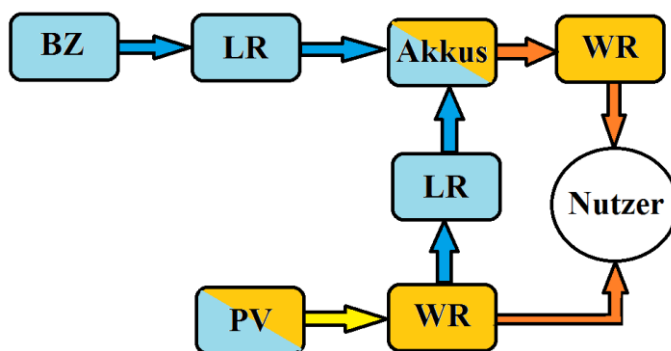


Abbildung 71 Optimierter Systemaufbau [3]

Durch Abgleichen von Wetterprognosen können Solarerträge kalkuliert werden und fehlende Erträge direkt durch die Brennstoffzelle in den Akku kompensiert werden. Dadurch wird die Brennstoffzelle nicht von größeren Lastschwankungen belastet und arbeitet effektiver.

Die Verbrauchssimulation erfolgte mit Hilfe einer kontinuierlichen, einer zeitlichen und einer zufälligen Last. Das Modell ist angelegt am standardisierten Lastprofil. Dieses System erwies sich im Verlauf der Arbeit als Verbesserungswürdig. Beim Einschalten der Verbraucher kam es zu hohen Einschaltströmen, die vom Wechselrichter nicht versorgt werden können. Des Weiteren ist das Lastprofil sehr stufig und lässt somit wenige Möglichkeiten zum Variieren der Lasten. Das Modell lässt sich durch abfahren das Lastprofils anhand eines automatisierten Lastwiderstand oder einstellen eines Stelltrafos mit einem Stellmotor optimieren. Dadurch werden hohe Einschaltströme verhindert und ein stufenloses variieren der Lastgänge ist möglich.

Zusammenfassend wurde in dieser Arbeit die Basis einer elektrischen Autarkie aufgezeigt. Diese Basis lässt sich durch weitere Optimierungen flexibler und effektiver gestalten.

## Quellen

- [1] autartec®. [www.autartec.com](http://www.autartec.com). [Zugriff am: 01. Juli 2016]
- [2] ifn-group®. [www.neuwertwirtschaft.de](http://www.neuwertwirtschaft.de) [Zugriff am: 08. Juli 2016]
- [3] Britz, Daniel. (2016). Eigene Darstellung.
- [4] Nourney, Vollmer GmbH & Co.KG. (2005). *Tabellenbuch Elektrotechnik*. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel.
- [5]
- [6] Niemeyer, D.-I. J. (2009). *Modellprädiktive Regelung eines PEM-Brennstoffzellensystems*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- [7] aeconversion.de. [Zugriff am: 28. September 2016] <http://aeconversion.de/de/index.html>.
- [8] i-tecc GmbH. [Zugriff am: 28. September 2016]. <http://www.i-tecc.de/>
- [9] HTW Berlin (02/2014). Individuelle Autarkie. *pV magazine* , 58-61.
- [10] Jendrischik PR. <http://www.cleanthinking.de> [Zugriff am: 08. September 2016]
- [11] Texas Instruments Incorporated. [www.ti.com](http://www.ti.com). [Zugriff am: 01. Oktober 2016]
- [12] spondeus solar Inh. Hanns-Stefan Finke. <http://www.photovoltaiksolarstrom.de>. [Zugriff am: 12. Oktober 2016]
- [13] Jürgen Giesen. <http://www.jgiesen.de>. [Zugriff am: 14. Oktober 2016]
- [14] Conrad Electronic SE. [www.conrad.de](http://www.conrad.de). [Zugriff am: 14. September 2016]
- [15] DATACOM Buchverlag GmbH. [Itwissen.info](http://Itwissen.info). [Zugriff am: 16. September 2016]
- [16] Philippe Zoss. [phzoss.blogspot.com](http://phzoss.blogspot.com). [Zugriff am: 07. September 2016]
- [17] ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG. [www.ebmpapst.com](http://www.ebmpapst.com). [Zugriff am: 07. September 2016]
- [18] Nanjing Clean Energy Electronic Co., Ltd. [www.cleanenergy-npt.com](http://www.cleanenergy-npt.com) [Zugriff am: 03. September 2016]
- [19] elektroniknet.de. [Zugriff am: 08. September 2016]  
[http://www.elektroniknet.de/uploads/media\\_uploads/images/1315991349-39-elektrisches-lastprofil.jpg](http://www.elektroniknet.de/uploads/media_uploads/images/1315991349-39-elektrisches-lastprofil.jpg).



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 "schwimmendes autartec <sup>®</sup> Haus" im Senftenberger Seenland [1] .....	1
Abbildung 2 Sitz ifn Anwenderzentrum GmbH in Lauchhammer [2] .....	2
Abbildung 3 Prinzipielle der Spannungserzeugung in einem Fotoelement [3] .....	3
Abbildung 4 Strom-Spannung-Kennlinie einer Solarzelle [5] .....	4
Abbildung 5 Schema einer Brennstoffzelle [3] .....	5
Abbildung 6 Übersicht eines üblichen FC-Systems [6] .....	7
Abbildung 7 Microinverter INV500-90EU RS485 [7] .....	8
Abbildung 8 Modul Verschaltung [7] .....	8
Abbildung 9 LiFePO <sub>4</sub> Akku mit BMS am Versuchsstand [3] .....	9
Abbildung 10 BMS von i-tecc [8] .....	10
Abbildung 11 Eigenverbrauchsanteil (links) und Autarkiegrad (rechts) in Abhängigkeit der PV-Leistung und nutzbaren Speicherkapazität, jeweils normiert auf den Jahresverbrauch an elektrischer Energie in MWh (1000 kWh) [9] .....	10
Abbildung 12 Heliocentris Nexa 1200 [10] .....	11
Abbildung 13 Beckhoff-Steuerung im Schaltschrank [3] .....	11
Abbildung 14 Schalttafel der BTU C-S [3] .....	12
Abbildung 15 Sonnenwinkel und Anstellwinkel [3] .....	13
Abbildung 16 Funktionsprinzip Bypass-Diode [3] .....	13
Abbildung 17 Schaltzeichen einer Diode [3] .....	14
Abbildung 18 Schaltfunktion eines N-Kanal MOS-FETs [3] .....	15
Abbildung 19 Block Diagram SM74611 [11] .....	15
Abbildung 20 Aufbau der Solarmodule [3] .....	15
Abbildung 21 Übersicht direkte und diffuse Strahlung [12] .....	16
Abbildung 22 Darstellung des Stundenwinkels [3] .....	17
Abbildung 23 Darstellung der Erdneigung [13] .....	17
Abbildung 24 Schema Energieumschaltung [3] .....	19
Abbildung 25 Schema des Messaufbaus [3] .....	20
Abbildung 26 Schaltplan Relaisplatine in EAGLE [3] .....	20
Abbildung 27 Funktionsprinzip einer Freilaufdiode [3] .....	21
Abbildung 28 Akkumanagement mit Netzfilter [3] .....	21
Abbildung 29 Schaltplan eines Netzfilters [3] .....	22
Abbildung 30 Wechselrichter [14] .....	22

Abbildung 31 Kurvenverlauf des CCCV-Ladeverfahrens .....	23
Abbildung 32 Laderegler der Firma i-tecc [8].....	23
Abbildung 33 Schaltung zur Spannungsmessung [3].....	23
Abbildung 34 Funktions-Diagramm des Stromsensors [11].....	24
Abbildung 35 Schaltschema des Stromsensors [11].....	25
Abbildung 36 Layout der Messumformungsplatine [3] .....	26
Abbildung 37 komplettes Akkumanagementsystem [3] .....	26
Abbildung 38 Vergleich reine und modifizierte Sinuswelle .....	27
Abbildung 39 Heliocentris Nexa 1200 [10] .....	29
Abbildung 40 Versuchsstand Brennstoffzelle [3] .....	29
Abbildung 41 Schema des Brennstoffzellensystems [3] .....	30
Abbildung 42 Brennstoffzellen-Stack Draufsicht [3].....	31
Abbildung 43 DRV im Brennstoffzellensystem [3].....	31
Abbildung 44. Purge-Ventil der Brennstoffzelle [3].....	31
Abbildung 45 Darstellung PWM [3] .....	32
Abbildung 46 Anschluss zur PWM-Steuerung des Lüfters [17].....	32
Abbildung 47 H2 Sensor im Lüfter-Gehäuse [3] .....	33
Abbildung 48 Arduino Mega2560 [3].....	34
Abbildung 49 Spannungsmessung der Brennstoffzelle [3] .....	34
Abbildung 50 Analogwert Aufbereitung auf der Platine [3].....	35
Abbildung 51 Schaltschema pull-down-Widerstand [3] .....	35
Abbildung 52 digitale Eingänge auf der Platine [3].....	36
Abbildung 53 Position der Lüfteransteuerung auf der Platine [3].....	36
Abbildung 54 Schaltschema Spulenansteuerung [3].....	37
Abbildung 55 Position der Ventilansteuerung auf der Platine [3].....	37
Abbildung 56 Position des 24 Volt-Schaltreglers auf der Platine [3] .....	38
Abbildung 57 Positionierung des Umschaltrelais auf der Platine [3] .....	40
Abbildung 58 Position und Schaltschema der Freischaltung [3] .....	40
Abbildung 59 Position des 5 Volt-Schaltregler auf der Platine [3].....	41
Abbildung 60 Funktions-Diagramm des NE555 A-Stabil [11].....	42
Abbildung 61 NE555-Schaltschema A-Stabil [11] .....	42
Abbildung 62 Position der Kurzschluss-Automatik [3] .....	43
Abbildung 63 Programmablauf im Hauptprogramm [3].....	44
Abbildung 64 Block-Diagramm der Initialisierung [3].....	45

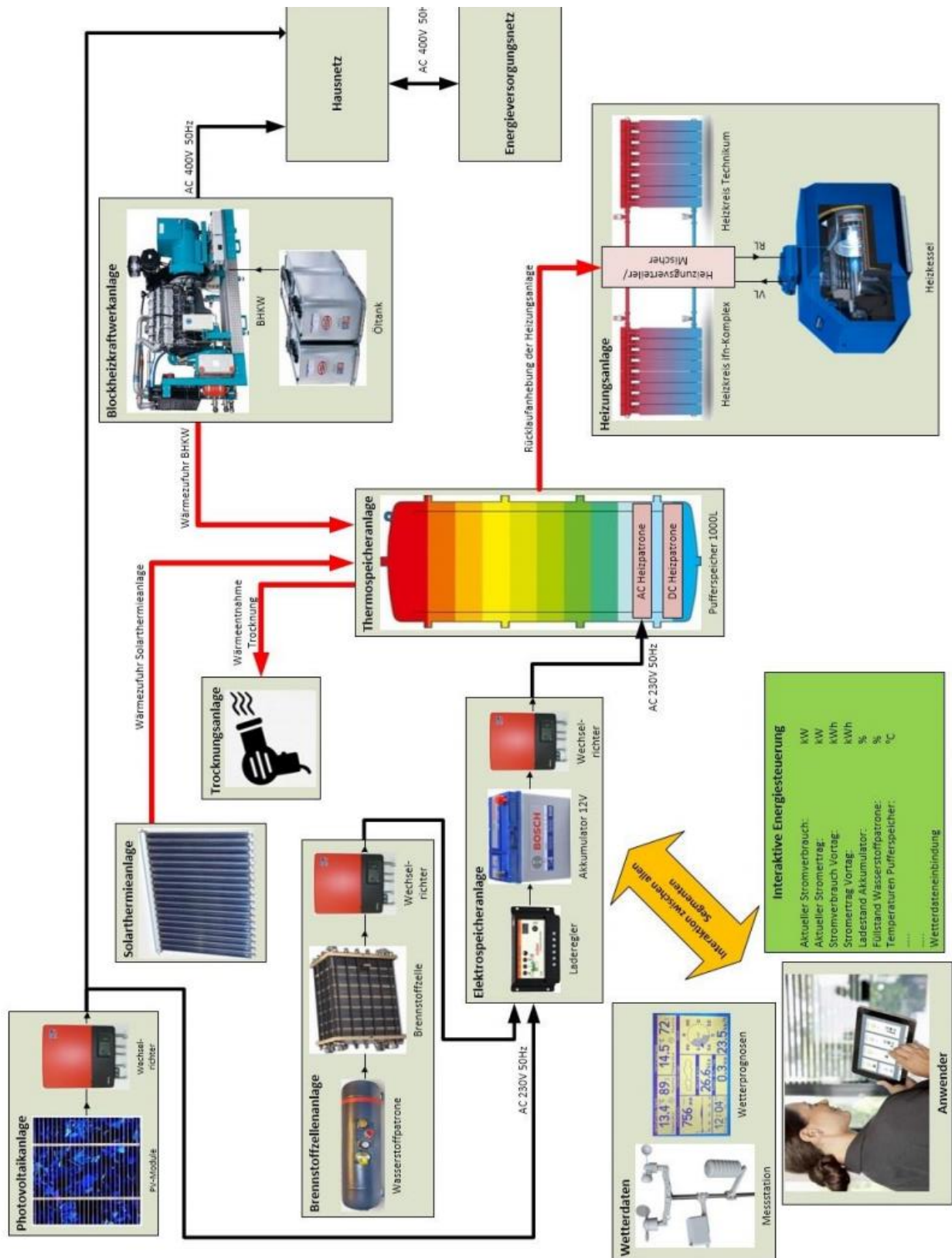
Abbildung 65 Kennlinie Lüfter-Drehzahl [3].....	46
Abbildung 66 Arduino Serial-Monitor [3] .....	48
Abbildung 67 Hochsetzsteller der Firma Hengjiaan [18].....	48
Abbildung 68 Einbindung der BZ ins System [3] .....	49
Abbildung 69 elektrisches Lastprofil eines Standard Haushaltes [19].....	50
Abbildung 70 Vergleich der Typtage in Übergangsmonaten [3] .....	51
Abbildung 71 Optimierter Systemaufbau.....	52

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Einteilung der Silicium Solarzellen [4] .....	3
Tabelle 2 Übersicht der Schwellenspannung von Dioden [4] .....	14
Tabelle 3 Technische Daten Wechselrichter [14].....	22
Tabelle 4 Technische Daten des Ladereglers [8].....	23
Tabelle 5 Variantenvergleich der Systeme .....	27
Tabelle 6 Technische Daten der Brennstoffzelle [10] .....	29
Tabelle 7 Tabelle aus dem Datenblatt des MagI <sup>3</sup> C's.....	38
Tabelle 8 Dimensionierung der Lasten [3] .....	51

## Anhang

### Anhang I Gesamtübersicht



## Anhang II Datenblatt PV-Module

# ReneSola

## Virtus<sup>®</sup>II

### Virtus<sup>®</sup>II Module

250W, 255W, 260W



Exzellenter Modulwirkungsgrad



Einfache Handhabung und Installation



Modulbelastbarkeit bis zu 5400 Pa



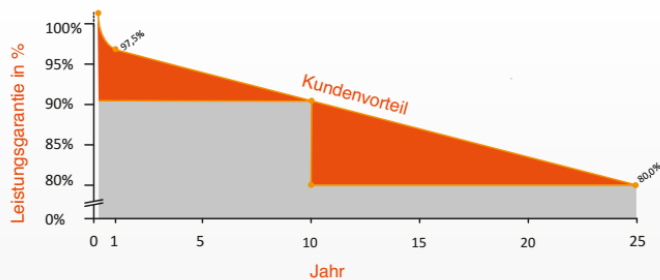
Zertifiziert und zugelassen nach IEC 61215,  
IEC 61730 und UL 1703 sowie den CE-Richtlinien



Gemäß den internationalen Qualitäts-, Umwelt- und  
Arbeitsschutzmanagementstandards hergestellt:  
ISO 9001, ISO 14001 und OHSAS 18001



Anwendungsklasse A, Sicherheitsklasse II, Brandklasse C



10 Jahre

Material und  
Verarbeitung

25 Jahre

Lineare Leis-  
tungsgarantie



ReneSola.com

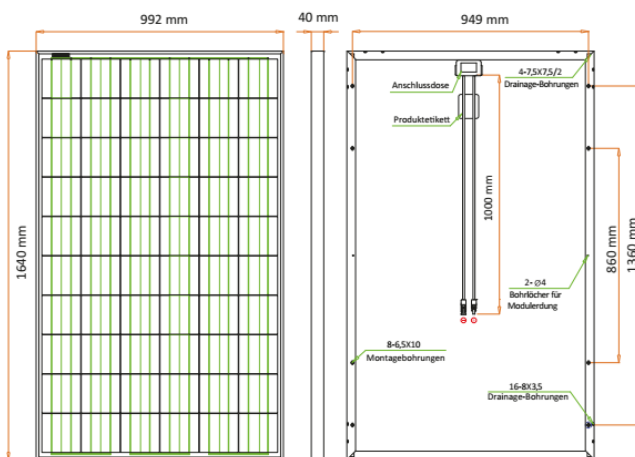


# ReneSola

## Virtus® II Module

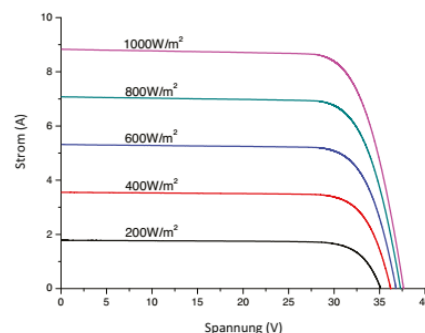
250W, 255W, 260W

### Abmessungen



Beispielhafte Abbildung

### I-V Kennlinie



### Effizienz bei variierender Einstrahlung

Einstrahlung	200W/m²	400W/m²	600W/m²	800W/m²	1000W/m²
Effizienz	15,8%	16,2%	16,2%	16,1%	16,0%

### Elektrische Eigenschaften

	JC250M-24/Bb	JC255M-24/Bb	JC260M-24/Bb
Maximale Leistung unter STC (P <sub>max</sub> )	250 W	255 W	260 W
Leistungstoleranz	0 ~ +5W	0 ~ +5W	0 ~ +5W
Modulwirkungsgrad	15,4%	15,7%	16,0%
Optimaler Betriebsstrom (I <sub>mp</sub> )	8,31 A	8,39 A	8,53 A
Optimale Betriebsspannung (V <sub>mp</sub> )	30,1 V	30,4 V	30,5 V
Kurzschlussstrom (I <sub>sc</sub> )	8,83 A	8,86 A	8,95 A
Leerlaufspannung (V <sub>oc</sub> )	37,4 V	37,5 V	37,6 V

STC (Standardtestbedingungen): Strahlungsintensität 1000 W/m², Modultemperatur 25°C, AM 1,5

### Elektrische Eigenschaften nach NOCT

	JC250M-24/Bb	JC255M-24/Bb	JC260M-24/Bb
Maximale Leistung (P <sub>max</sub> )	185 W	189 W	193 W
Optimaler Betriebsstrom (I <sub>mp</sub> )	6,57 A	6,63 A	6,74 A
Optimale Betriebsspannung (V <sub>mp</sub> )	28,2 V	28,5 V	28,6 V
Kurzschlussstrom (I <sub>sc</sub> )	7,12 A	7,20 A	7,27 A
Leerlaufspannung (V <sub>mp</sub> )	35,0 V	35,1 V	35,2 V

Werte bei normaler Betriebstemperatur der Zelle, Einstrahlungsstärke 800 W/m², AM (Air Mass) 1,5, Windgeschwindigkeit von 1 m/s

### Mechanische Eigenschaften

Solarzellen	Virtus II (Polykristallin) 156 x 156 mm, 60 (6x10) Zellen in Reihe
Glas	Hohe Transmission, niedriger Eisengehalt, temperiertes Glas
Rahmen	Eloxierte Aluminiumlegierung
Anschlussdose	Schutzklasse IP65/ IP67, mit Bypass-Dioden
Dimensionen (L x B x T)	*1640 x 992 x 40 mm
Kabellänge	4 mm² (EU)/12 AWG (US), 1000 mm
Gewicht	18,5 kg
Montagebohrungen	Siehe Zeichnung

### Temperatureigenschaften

Temperaturkoeffizient von V <sub>oc</sub>	-0,30%/°C
Temperaturkoeffizient von I <sub>sc</sub>	0,04%/°C
Temperaturkoeffizient von P <sub>max</sub>	-0,40%/°C
Nenntemperatur bei Zellbetrieb (NOCT)	45°C ± 2°C

### Verpackungseinheit

Container	20' GP	40' GP	40' HQ
Paletten pro Container	12	28	28
Stückzahl pro Container	300	700	770

Rev No: JC/T105/2013.02 \*Kontaktieren Sie ReneSola zur Spezifizierung der Toleranzen.  
Alle Rechte vorbehalten. Wir behalten uns kurzfristige Änderungen der in diesem Datenblatt enthaltenen Spezifikationen vor.

### Maximalleistung

Modulbetriebstemperatur	-40°C ~ +85°C
Maximale Systemspannung	1000VDC (EU) / 600VDC (US)
Maximaler Bemessungsstrom bei Reihensicherung	20A (EU) / 20A (US)

## Anhang III Datenblatt BMS



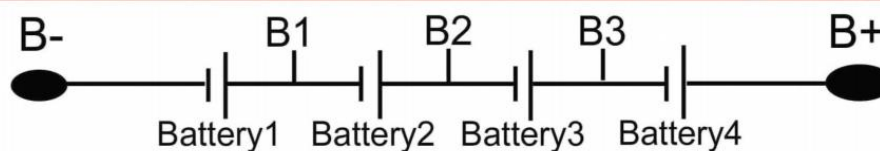
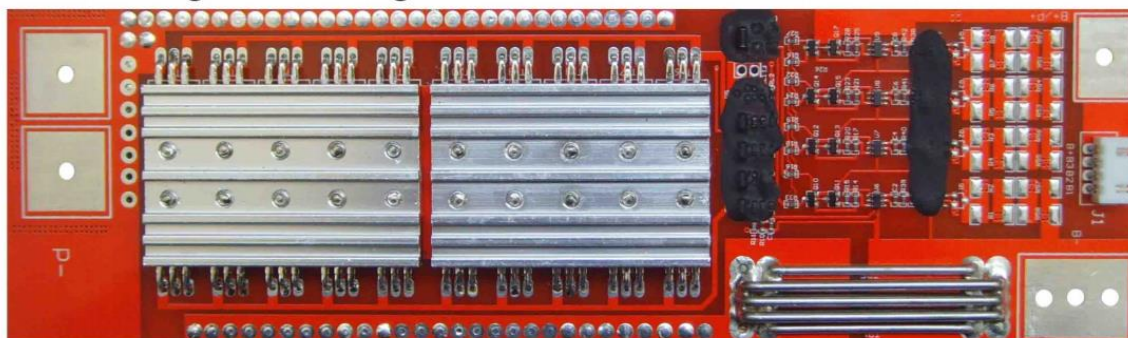
BMS LiFePO 4S 60A (12V)		
Artikel-Nr.: 5000752		
Spannung	Ladespannung	14,4V (3,6V pro Zelle)
	Balancer-Spannung pro Einzelzelle	3,60V $\pm$ 0,025V
Leistung	Balancer-Ausgleichsstrom pro Zelle	144mA $\pm$ 10mA
	Eigenverbrauch	$\leq$ 20 $\mu$ A
	max. Ladestrom	60A
	max. Entladestrom	60A
Ladebegrenzung	Aktivierung	3,9V $\pm$ 0,025V
	Verzögerung	0,5s bis 2s
	Freigabespannung	3,8V $\pm$ 0,05V
Tiefentladeschutz	Aktivierung	2V $\pm$ 0,05V
	Verzögerung	10ms bis 200ms
	Freigabespannung	2,3V $\pm$ 0,05V
Überlastschutz	Aktivierungsspannung	0,62V
	Aktivierungsstrom	130A $\pm$ 20A
	Verzögerung	5ms bis 20ms
	Freigabebedingung	Last trennen
Kurzschluss-Schutz	Erkennung	externer Kurzschluss
	Verzögerung	200 $\mu$ s bis 500 $\mu$ s
Widerstand	Innenwiderstand	$\leq$ 20m $\Omega$
Temperatur	Betriebstemperatur	-40°C bis +85°C
	Lagertemperatur	-55°C bis +125°C
Maße	Abmessungen	222x65x15mm
	Gewicht	ca. 150g



P+=B+=Charge+/Discharge+

P- =Charge-/Discharge-

Size:L222\*W65\*T15mm

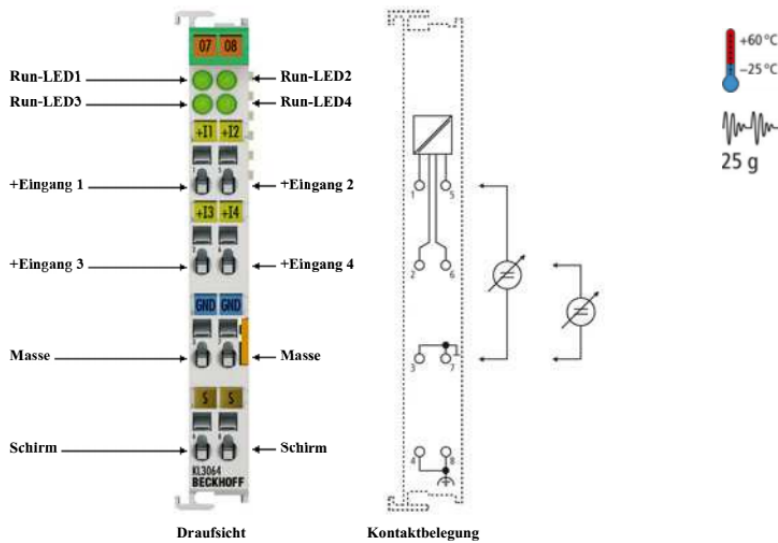


Bei Inbetriebnahme muss die Schaltung möglicherweise freigegeben werden, indem die Nennspannung am Ausgang (P-) angelegt wird.

## Anhang IV Beckhoff Klemme KL3064

### Analog-Eingang

### KL3064

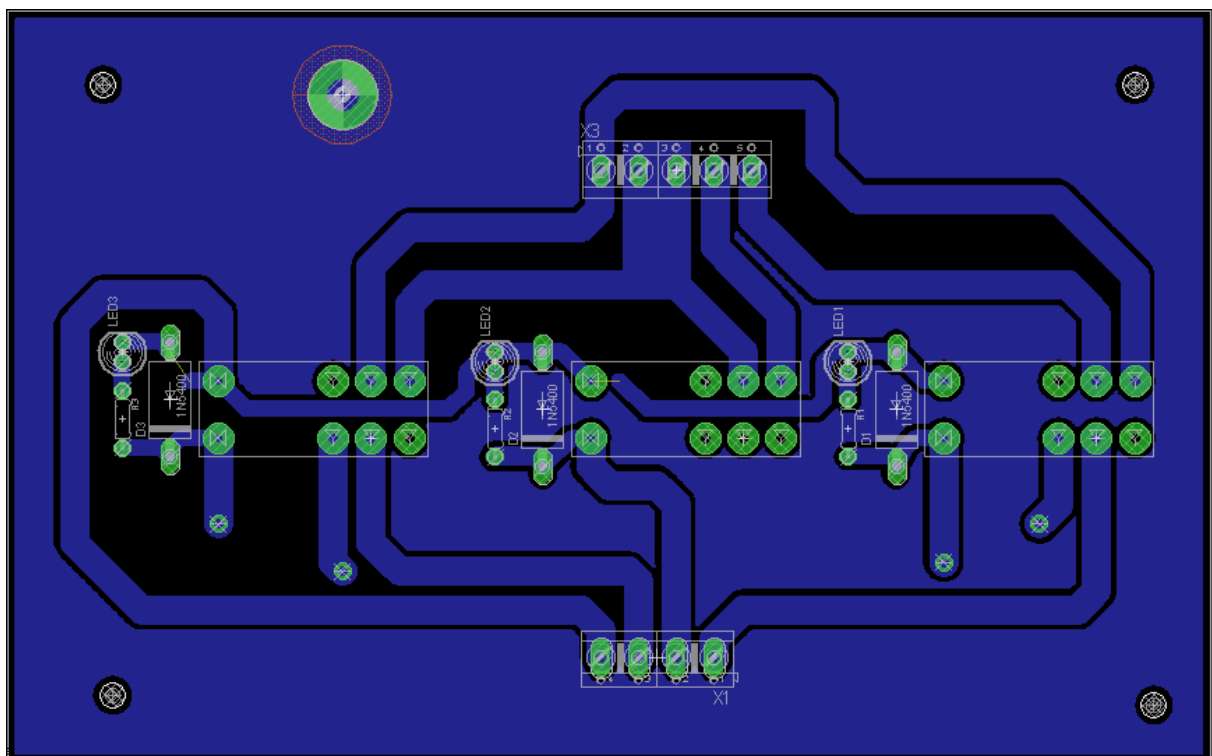
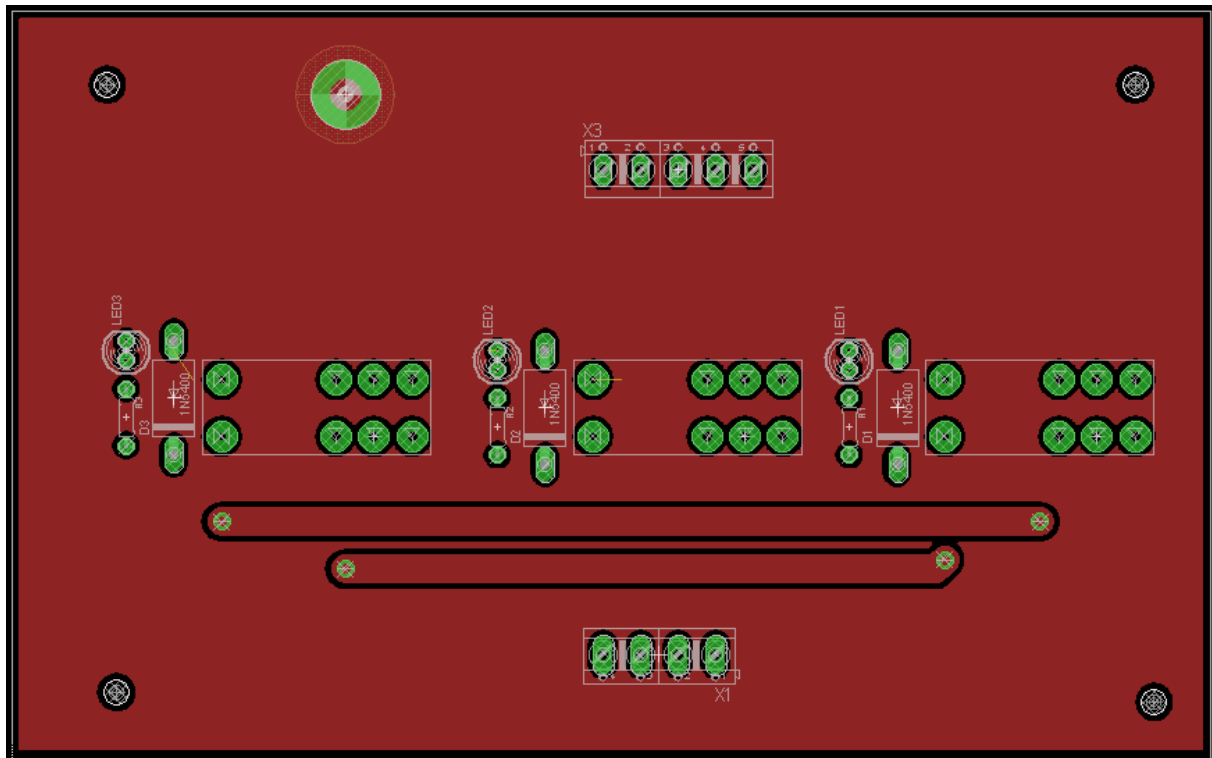


## KL3064 | 4-Kanal-Analog-Eingangsklemme 0...10 V

Die analoge Eingangsklemme KL3064 verarbeitet Signale im Bereich von 0 bis 10 V. Die Spannung wird mit einer Auflösung von 12 Bit digitalisiert und galvanisch getrennt zum übergeordneten Automatisierungsgerät transportiert. Die Eingangskanäle einer Busklemme besitzen ein gemeinsames Massepotenzial. Die KL3064 vereint vier Kanäle in einem Gehäuse. Die Run-LEDs zeigen den Datenaustausch mit dem Buskoppler an.

Technische Daten	KL3064   KS3064
Anzahl Eingänge	4
Spannungsversorgung	über den K-Bus
Signalspannung	0...10 V
Technik	single-ended
Innenwiderstand	> 130 kΩ
Gleichtaktspannung U <sub>CM</sub>	–
Auflösung	12 Bit
Wandlungszeit	~ 4 ms
Messfehler	< ±0,3 % (bezogen auf den Messbereichsendwert)
Potenzialtrennung	500 V (K-Bus/Signalspannung)
Stromaufn. Powerkontakte	– (keine Powerkontakte)
Stromaufnahme K-Bus	85 mA typ.
Breite im Prozessabbild	Input: 4 x 16-Bit-Daten (4 x 8-Bit-Control/Status optional)
Konfiguration	keine Adress- oder Konfigurationseinstellung
Gewicht	ca. 80 g
Betriebs-/Lagertemperatur	-25...+60 °C/-40...+85 °C
Relative Feuchte	95 % ohne Betauung
Schwingungs-/Schockfestigkeit	gemäß EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMV-Festigkeit/-Aussendung	gemäß EN 61000-6-2/EN 61000-6-4
Schutzart/Einbaulage	IP 20/beliebig
Steckbare Verdrahtung	bei allen KSxxx-Klemmen
Zulassungen	CE, UL, Ex, GL

## Anhang V Platinen Layout der Relais-Platine



## Anhang VI Datenblatt Reaktionslüfter

R1G175-AB63-02

### EC centrifugal fan

backward curved, single inlet

**ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG**

Bachmühle 2

D-74673 Mulfingen

Phone: +49(0)7938/81-0

Fax: +49(0)7938/81-110

info1@de.ebmpapst.com

www.ebmpapst.com

#### Nominal data

Type	R1G175-AB63-02	
Motor	M1G055-BD	
Nominal voltage	[VDC]	24
Nominal voltage range	[VDC]	16 .. 28
Type of data definition		rfa
Speed	[min <sup>-1</sup> ]	3100
Power input	[W]	34
Current draw	[A]	1.6
Min. ambient temperature	[°C]	- 25
Max. ambient temperature	[°C]	+ 60

ml = max. load · me = max. efficiency · rfa = running at free air · cs = customer specs · cu = customer unit  
 Subject to alterations



**R1G175-AB63-02**

## EC centrifugal fan

backward curved, single inlet

### Technical features

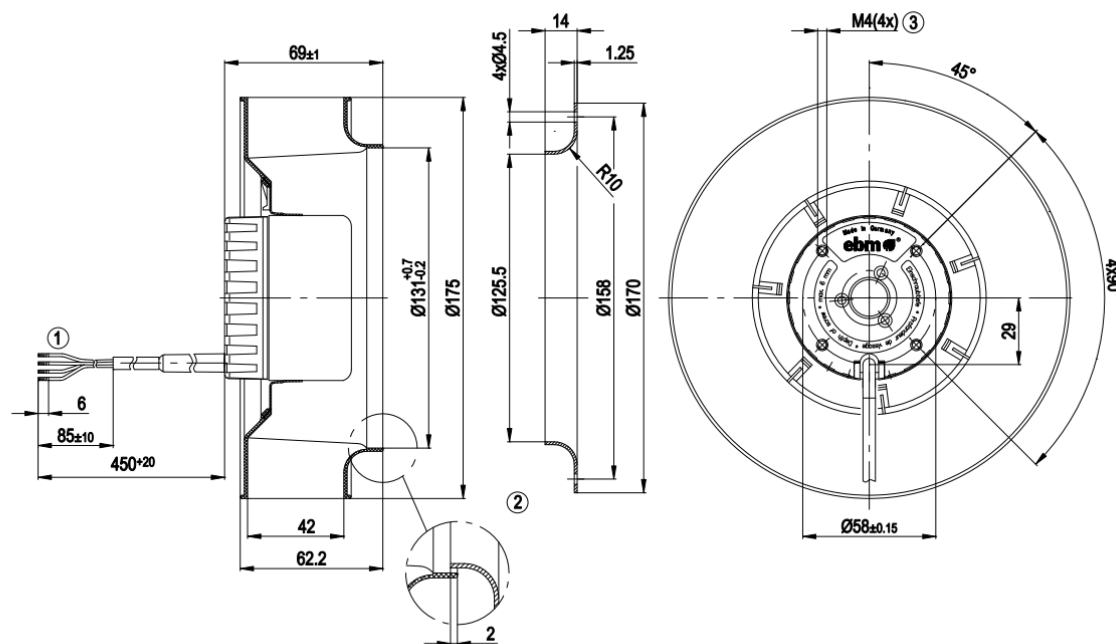
Size	175 mm
Operation mode	S1
Direction of rotation	Clockwise, seen on rotor
Mounting position	Any
EMC interference emission	Acc. to EN 61000-6-3
EMC interference immunity	Acc. to EN 61000-6-2
Insulation class	"B"
Cable exit	Variable
Condensate discharge holes	None
Bearing motor	Ball bearing
Mass	0.74 kg
Material of impeller	PA plastic 6.6, fiberglass-reinforced
Motor protection	Reverse polarity and locked-rotor protection
Product conforming to standard	EN 60950-1
Surface of rotor	Thick layer passivated
Number of blades	7
Type of protection	IP 22
Technical features	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tach output</li> <li>- Motor current limit</li> <li>- Soft start</li> <li>- Control input 0-10 VDC / PWM</li> </ul>
Max. permissible ambient motor temp. (transp./ storage)	+80 °C
Min. permissible ambient motor temp. (transp./storage)	-40 °C
Approval	CSA C22.2 Nr.77; UL 1004-1

R1G175-AB63-02

## EC centrifugal fan

backward curved, single inlet

### Product drawing



1	Connection line AWG20, 4 x brass lead tips crimped
2	Accessory part: Inlet nozzle 09576-2-4013, not included in the standard scope of delivery
3	Depth of screw max. 6 mm

R1G175-AB63-02

## EC centrifugal fan

backward curved, single inlet

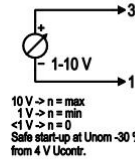
### Connection screen

#### Customer circuit

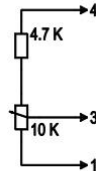
##### Full speed



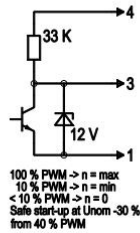
##### Speed setting



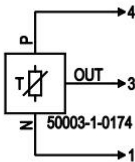
##### Speed setting with fixed resistance



##### Speed setting via PWM 1-10 kHz

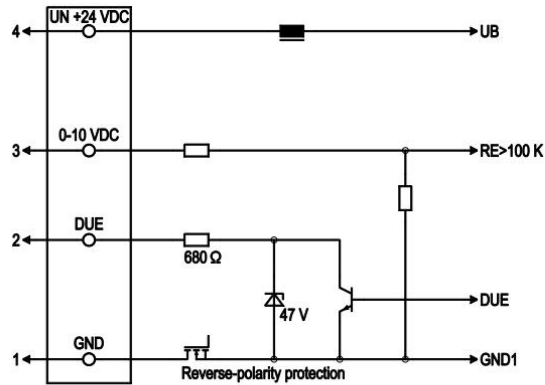


##### Setting of values via temperature controller



#### Connection

#### Fan / motor



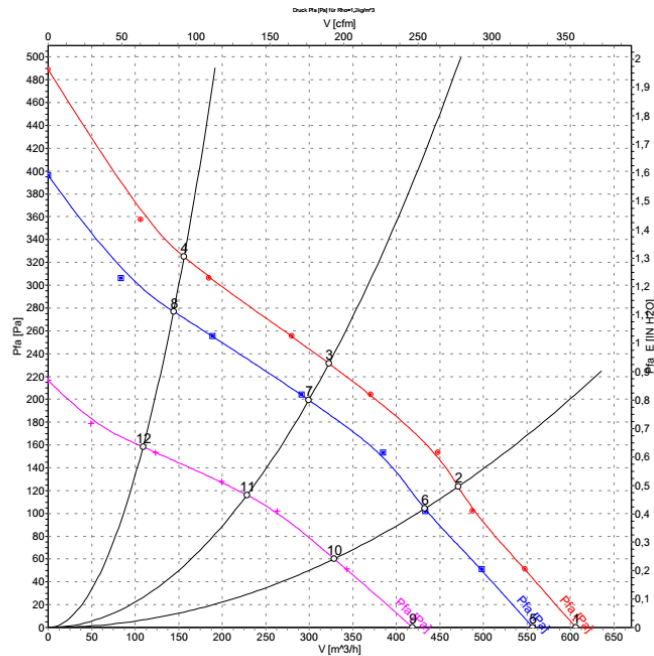
Line	No.	Signal	Colour	Function / assignment
1	1	GND	blue	Reference mass
1	2	DUE	white	Speed monitoring output, 2 pulses per rotation, Isink max = 10 mA
1	3	0-10 VDC	yellow	Control input Re > 100 K
1	4	Un +24 VDC	red	Power supply 24 VDC, residual ripple 3.5 %

R1G175-AB63-02

## EC centrifugal fan

backward curved, single inlet

### Charts: Air flow



Measurement: LU-44776  
Measurement: LU-44775  
Measurement: LU-44777

### Measured values

	U	n	P <sub>1</sub>	I	$\dot{V}$	P <sub>fa</sub>
	[V]	[min <sup>-1</sup> ]	[W]	[A]	[m³/h]	[Pa]
1	28	3375	46	1.83	605	0
2	28	3170	48	1.97	470	123
3	28	3105	49	2.01	325	231
4	28	3255	47	1.91	155	325
5	24	3100	34	1.60	555	0
6	24	2915	39	1.79	435	100
7	24	2885	39	1.82	300	200
8	24	3010	37	1.69	145	275
9	16	2320	16	1.10	420	0
10	16	2225	17	1.21	330	60
11	16	2205	18	1.24	230	116
12	16	2270	16	1.15	110	158

## Anhang VII Programmcode der Brennstoffzellen-Steuerung

```
#include <Wire.h>

boolean safe = 0;    // if safety devices are ok, safe HIGH
byte error = 0;      // error byte
byte ubyte_err = 0;  //Error byte in function err()
byte freq;           // fan PWM
byte freq_old;       // Fan PWM 1 cycle ago
byte stay = 160;     // PWM main Valve
float ampere;        // calculated Current
float volt;          // calculated Voltage
float power;         // calculated power
int press1;          // stack Pressure
int press2;          // pressure before regulator
boolean initi = 0;   // high if start complete

byte h2 = 33;        // H2 Sensor
byte chain = 36;     //safety chain
byte start_button = 29; // start/stop/confirm switch
byte overtemp = 25;  // overtemperature switch under Stack
byte pressure1 = 5;   // stack pressure (0-0,6 bar)
byte pressure2 = 6;   // bottle pressure (0-25 bar)
byte voltage = 2;     // Voltage divider 1:10
byte current = 3;     // Current Sensor ACS758LCB-050U-PFF-T
byte bglight = 34;    // LED Backlight
byte on = 27;         //switch between standby(LOW) an regulate(HIGH)

byte purge = 23;      //Purge Valve
byte h2_valve = 10;    //H2 main valve. PWM analog Output
byte output_power = 53; //MOS-FET switch Output ground
byte selfpower1 = 50;
byte selfpower2 = 48;
byte selfpower3 = 46; //relay switch from extern power to stackpower
```

```
byte led1 = 8;    //PWM analog Output (Error)
byte led2 = 9;    //PWM analog Output (run)
byte led3 = 7;    //PWM analog Output (start, indikator)
byte fan = 11;    //PWM analog Output
```

```
void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    pinMode(h2,INPUT);
    pinMode(chain,INPUT);
    pinMode(start_button,INPUT);
    pinMode(overtemp,INPUT);

    pinMode(purge,OUTPUT);
    pinMode(h2_valve,OUTPUT);
    pinMode(output_power,OUTPUT);
    pinMode(selfpower1,OUTPUT);
    pinMode(selfpower2,OUTPUT);
    pinMode(selfpower3,OUTPUT);
    pinMode(led1,OUTPUT);
    pinMode(led2,OUTPUT);
    pinMode(led3,OUTPUT);
    pinMode(fan,OUTPUT);
```

```
digitalWrite(h2_valve,LOW);
digitalWrite(purge,LOW);
digitalWrite(output_power,LOW);
digitalWrite(selfpower1,LOW);
digitalWrite(selfpower2,LOW);
digitalWrite(selfpower3,LOW);
digitalWrite(led1,LOW);
digitalWrite(led2,LOW);
digitalWrite(led3,LOW);
digitalWrite(fan,LOW);
```



```
Serial.begin(115200);

}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    safety();
    if (!safe)
    {
        Serial.println("Error detectet. System shutdown");
        shutoff();
    }
    else if (safe && !init && digitalRead(start_button))
    {
        Serial.println("Start");
        start();
    }
    else if (safe && init && digitalRead(on))
    {
        Serial.println("Regulate");
        regulate();
    }
    else if (safe && init && !digitalRead(on))
    {
        Serial.println("Standby");
        standby();
    }
    else
    {
        Serial.println("Safety devices ok. Wait for init :-D System");
        analogWrite(led2,127);
        analogWrite(led2,127);
    }
}
```

```
void software_reset() // Restarts program from beginning but does not reset the peripherals and registers
```

```
{  
  asm volatile (" jmp 0");  
}
```

```
void start(){  
  analogWrite(led3,127);  
  analogWrite(led2,0);  
  analogWrite(h2_valve,255);  
  delay(500);  
  analogWrite(h2_valve,stay);  
  Serial.println("open main-valve");  
  analogWrite(fan,127);  
  Serial.println("start fan");  
  delay(3000);  
  digitalWrite(purge,HIGH);  
  Serial.println("purge");  
  delay(600);  
  digitalWrite(purge,LOW);  
  delay(2000);  
  for(int i =0; i <= 1; i++){  
    safety();  
    if (safe)  
    {  
      digitalWrite(purge,HIGH);  
      Serial.println("purge");  
      delay(600);  
      digitalWrite(purge,LOW);  
      delay(2000);  
    }  
    else  
    {
```

```

    software_reset();
  }
}

fan_start:
  safety();
  if (!safe)
  {
    software_reset();
  }

  else if (analogRead(voltage) < 614) //3 Volt. Voltage divider have translation of 10. Stack Voltage
  set to 30 V.
  {
    Serial.println("fan_start");
    Serial.println(analogRead(voltage)*0.048);
    goto fan_start;    //Reach the Stack Voltage, start System. Else check safety loop
again.
  }

  else
  {
    //digitalWrite(selfpower1,HIGH);
    //digitalWrite(selfpower2,HIGH);
    //digitalWrite(selfpower3,HIGH);

    analogWrite(fan,60);    // reduce fan speed. Set own Powermanagement. Show with
LED, System is ready.
    analogWrite(led3,0);
    analogWrite(led2,127);
    initi = HIGH;
  }
}

void regulate()
{
  digitalWrite(output_power,HIGH);
  while(true)
  {

```

```
warning();
safety();
if (!digitalRead(on) || !safe)
{
    break;
}
else
{
    volt = analogRead(voltage)*0.048; //in V
    ampere = (analogRead(current)*4.88 - 600)/60; //in A
    power = volt * ampere ;           //Linear Current Sensor ACS758LCB-050U-PFF-T * Stack Voltage
    if (power > 50)
    {
        freq = (power-50)*7/38+60 ;    // Calculate PWM for fan. Fan min. value 50.
        Serial.print("Ausgangsleistung: ");
        Serial.println(power);
        if (freq < 1.1*freq_old)
        {
            delay(1000);
            analogWrite(fan,freq);
            freq_old = freq;
            Serial.print("Fanspeed gesenkt auf: ");
            Serial.println(freq*100/255);
            Serial.print("Spannung: ");
            Serial.println(volt);
            Serial.print("Strom:");
            Serial.println(ampere);
        }
    }
    else
    {
        analogWrite(fan,freq);
        Serial.print("Fanspeed korrigiert auf: ");
        Serial.println(freq*100/255);
        Serial.print("Spannung: ");
```

```

        Serial.println(volt);
        Serial.print("Strom:");
        Serial.println(ampere);
        freq_old = freq;
    }
}
else
{
    Serial.println("low Power mod");
    Serial.print("Spannung: ");
    Serial.println(volt);
    Serial.print("Strom:");
    Serial.println(ampere);
    analogWrite(fan,60);
    freq_old = freq;
}
}
}

void standby()
{
    digitalWrite(output_power,LOW);
    analogWrite(h2_valve,0);
    analogWrite(fan,0);
    analogWrite(led2,0);
    delay(1000);
    while(true)
    {
        safety();
        Serial.println(analogRead(voltage)*0.048);
        if (safe && !digitalRead(on))
        {
            analogWrite(led3,127);

```

```
delay(500);
analogWrite(led3,0);
delay(500);
if (analogRead(voltage) < 460)    //if voltage under 23 Volt, start system
{
    newstart();
    analogWrite(fan,0);
    analogWrite(h2_valve,0);
}
}
else if (safe && digitalRead(on))
{
    analogWrite(h2_valve,255);
    analogWrite(fan,127);
    delay(500);
    analogWrite(h2_valve,stay);
    delay(2000);
    while(analogRead(voltage) < 532)
    {
        safety();
        if (safe)
        {
            delay(500);
        }
        else
        {
            break;
        }
    }
    if (safe)
    {
        digitalWrite(output_power,HIGH);
        analogWrite(fan,60);
        break;
    }
}
```



```
        }
    else
    {
        break;
    }
}
else
{
    break;
}
}
}

void newstart(){
    analogWrite(h2_valve,255);
    delay(500);
    analogWrite(h2_valve,stay);
    analogWrite(fan,80);
    delay(1200);
    while(analogRead(voltage) < 580)
    {
        safety();
        if (safe)
        {
            delay(500);
        }
        else
        {
            break;
        }
    }
}
```

```
void safety() //Check all safety devices.
```

```
{  
  if (!digitalRead(h2))  
  {  
    safe = 0;  
    analogWrite(led1,127);  
    analogWrite(led2,0);  
    analogWrite(led3,0);  
    err(2);  
  }  
  else if (!digitalRead(chain))  
  {  
    safe = 0;  
    analogWrite(led1,127);  
    analogWrite(led2,0);  
    analogWrite(led3,0);  
    err(1);  
  }  
  else if (digitalRead(overtemp))  
  {  
    safe = 0;  
    analogWrite(led1,127);  
    analogWrite(led2,0);  
    analogWrite(led3,0);  
    err(6);  
  }  
  else  
  {  
    safe = 1;  
    analogWrite(led1,0);  
  }  
}  
void warning()  
{  
  press1 = analogRead(pressure1);
```

```
press2 = analogRead(pressure2);
if (press1 > 786) //check Stack Pressure. Overpressure 0,5 and underpressure 0,2 bar
{
    err(4);
}
else if (press1 < 376)
{
    err(3);
}
if (press2 < 144) // Bottle under 2 bar
{
    err(5);
}
}

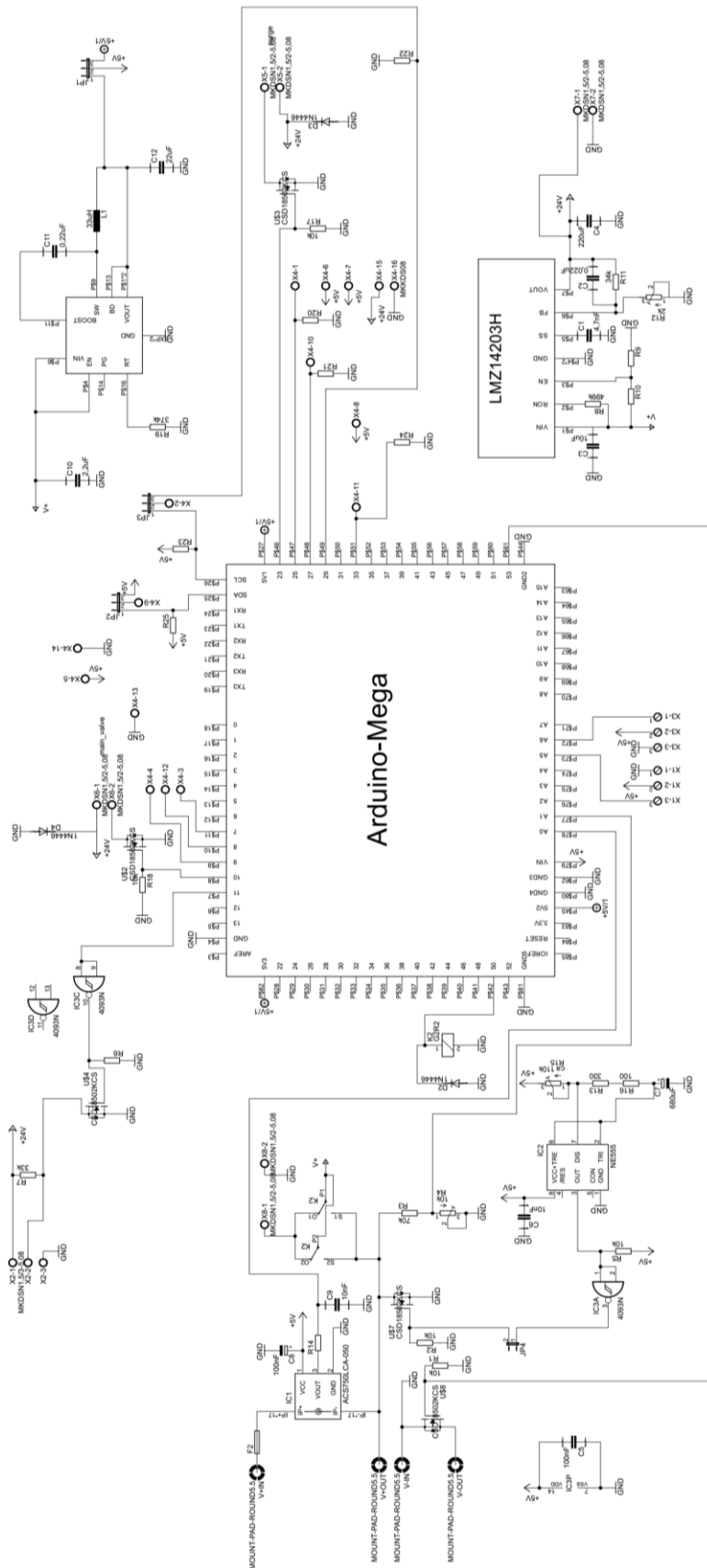
void err(byte ubyte_err) //generate an error byte and transmitt to serial monitor
{
    switch(ubyte_err){
        case 1:
            error = 1;
            Serial.println("Safety chain error.");
            break;
        case 2:
            error = 2;
            Serial.println("H2 was detected. Check System for leaks.");
            break;
        case 3:
            error = 3;
            Serial.println("Stack underpressure.");
            break;
        case 4:
            analogWrite(h2_valve,0);
            //digitalWrite(selfpower1,LOW);
            //digitalWrite(selfpower2,LOW);
```

```
//digitalWrite(selfpower3,LOW);
digitalWrite(output_power,LOW);
analogWrite(fan,0);
digitalWrite(purge,HIGH);
delay(2000);
digitalWrite(purge,LOW);
error = 4;
Serial.println("Stack overpressure. Contact Service.");
shutoff();
break;
case 5:
    error = 5;
    Serial.println("System underpressure. Please check and change H2 Bottle.");
    break;
case 6:
    error = 6;
    Serial.println("Overtemp Stack");
    break;
    }
}
```

```
void shutoff() //set all outputs low.Wait for restart and safety devices are ok
{
    digitalWrite(output_power,LOW);
    analogWrite(fan,0);
    //digitalWrite(selfpower1,LOW);
    //digitalWrite(selfpower2,LOW);
    //digitalWrite(selfpower3,LOW);
    analogWrite(h2_valve,0);
    analogWrite(led2,0);
    analogWrite(led3,0);
    digitalWrite(purge,HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(purge,LOW);
}
```

```
while(true)
{
  safety();
  if (safe & digitalRead(start_button))
  {
    analogWrite(led1,0);
    newstart();
    if (safe)
    {
      //digitalWrite(selfpower1,HIGH);
      //digitalWrite(selfpower2,HIGH);
      //digitalWrite(selfpower3,HIGH);
      break;
    }
    else
    {
      shutoff();
    }
  }
  else if (safe & !digitalRead(start_button))
  {
    analogWrite(led1,0);
    delay(500);
    analogWrite(led1,127);
    delay(500);
  }
}
```

## Anhang VIII Schaltplan Brennstoffzellensteuerung





## Anhang IX Oberseite Platinen Layout der Brennstoffzellen-Steuerung

